

Aalto-yliopisto
Kemian tekniikan korkeakoulu
Materiaalitekniikan koulutusohjelma

Kati Kulmala

Elektroniikkatuotteen saannon parantaminen

Diplomityö
Espoo 16.2.2016

Valvoja: Professori Sami Franssila
Ohjaaja: DI Satu Savolainen-Pulli

Tekijä: Kati Kulmala		
Työn nimi: Elektroniikkatuotteen saannon parantaminen		
Sivumäärä: 78 + 8	Päiväys: 16.2.2016	Työn sijainti: MT
Professuuri: Materiaalitiede		Koodi: MT-0.60
Työn valvoja: Professori Samuli Franssila		
Työn ohjaaja: DI Satu Savolainen-Pulli		
<p>Tämä diplomityö perehtyy elektroniikkatuotteen valmistusprosessiin ja analysoi eri prosessivaiheiden vaikutuksia saantotasoon. Työssä selvitetään hylättyjen tuotteiden vikojen alkuperiä sekä haetaan parannuskeinoja vikojen eliminoimiseksi. Saannon tason nostaminen tuottaa säästöä sekä kustannuksissa että materiaaleissa ja raaka-aineissa.</p> <p>Tutkimuksessa hyödynnettiin tilastollista tutkimusta, kustannuslaskentaa ja laadullista tutkimusta. Valmistusprosessissa olevien tarkastusten ja testausten saantotilastoja seurattiin tietokannasta, jonne tulokset tallentuivat. Tuotantoprosessissa käytettiin visuaalista tarkastusta sekä sähköistä testausta. Sähköisen testauksen luotettavuutta arvioitiin lisäksi Gage R&R-tutkimuksella. Hylättyjä tuotteita tutkittiin tarkemmin optisesti ja suurimmat hylkäyssyyt kohdennettiin valmistusprosessien eri vaiheisiin. Tämän jälkeen analysoitiin johtuivatko hylkäyssyyt nimenomaan kyseisen vaiheen prosessoinnista vai mahdollistiko prosessi vain vian ilmenemisen. Sen jälkeen prosessille kehitettiin parannusehdotus viallisten tuotteiden määrän eliminoimiseksi.</p> <p>Suurimmiksi viallisten tuotteiden lähteeksi paljastuivat pinnoitusprosessit sekä anturin valmistuksen nystyttämis- ja etsausprosessit. Mikäli näiden prosessien aiheuttamat hylkäyssyyt saataisiin eliminoidua, hukasta aiheutuvia kustannuksia saataisiin alennettua huomattavasti. Esimerkin realistisilla laskelmilla hukkakustannuksia voidaan alentaa prosessiketjuissa jopa 70-80 %, mikäli suurimmat vikaantumisen juurisyyt saataisiin eliminoidua täysin.</p>		
Avainsanat: elektroniikan kokoonpano, flip chip -teknologia, saanto, saannon parantaminen, suojapinnoitus, adhesiivi, juotosnysty, anturi		Julkaisukieli: suomi

Author: Kati Kulmala		
Subject of the thesis: Yield Improvement of an Electronic Device		
Number of pages: 78 + 8	Date: 16.2.2016	Library location: MT
Professorship: Materials Science		
Supervisor: Professor Sami Franssila		
Instructor: Satu Savolainen-Pulli, M.Sc		
<p>This thesis studies an assembly process of an electronic device in a production environment. The yield level of a manufacturing process is of great importance from the economical as well as from the ecological viewpoint to the producing company. By producing less faulty products and more functional products manufacturing costs are reduced and less waste is produced.</p> <p>This study was conducted using statistical process control tools and qualitative and quantitative analysis of the faulty products. Visual inspection and electrical testing were parts of the production process, from which information about faulty products could be acquired. The yield levels as well as the causes for failing the tests and inspections were recorded into a database, where they could be retrieved for later investigations. The reasons for test failures were identified and connected to the process causing them. Afterwards suggestions for process improvements were created.</p> <p>The processes causing largest shares of the faulty products, or “scrap”, were identified to be the coating processes, the mounting of the solder balls on to the wafer and sensor etching process. If these processes could be improved so that these largest root causes could be completely eliminated, considerable costs could be saved. Using a realistic calculation example the so-called scrap costs could be lowered by as much as 80 percent. However, more research and testing should be done before fully implementing new processes or process changes into the production line.</p>		
Keywords: yield, yield improvement, flip chip, adhesive, coating, solder bump, assembly, electronic device, sensor		Publication language: Finnish

Alkusanat

Tämä diplomityö valmistui vuoden 2015 joulukuussa puolen vuoden tutkimustulosten keräämisen, elektroniikan valmistuksen aihepiiriin perehtymisen sekä itse kirjoitustyön tuloksena. Työ lähti liikkeelle elektroniikkatuotteen saannon analysoiminen mielessä, mutta alkoi muotoutua hitaasti myös sisältämään ehdotuksia mahdollisista jatkotutkimuksista sekä parantamistoimenpiteistä, kun niitä alkoi tutkimustyön ohessa löytymään. Työtä tehdessä sain perehtyä mielenkiintoisiin valmistusprosesseihin sekä niihin liittyvään talousnäkökulmaan, mitkä olen kokenut korvaamattoman arvokkaiksi ammattillisen kehittymiseni kannalta.

Tahdon ensimmäiseksi kiittää työni valvojaa professori Sami Franssilaa, jonka vankkumaton asiantuntemus elektroniikan aihepiiriä kohtaan ylipäättään mahdollisti tämän diplomityön syntymisen. Häneltä sain paljon rakentavaa palautetta ja aina tarvittaessa tukea kirjoitusprosessiini liittyen. Kiitän myös ohjaajaani Satu Savolainen-Pullia, joka johdatti minut tämän mielenkiintoisen aiheen pariin sekä mahdollisti työn suorittamisen, ja erityisesti kollegaani Antti Hyväristä, jonka kanssa pidetyt epäviralliset aivoriihet toivat tähän työhön paljon oivalluksia ja uusia ulottuvuuksia. Kiitän vielä ystävääni Antti Laukkasta, jonka ylivoimainen äidinkielen osaaminen sekä tarkkuus hioivat diplomityöni ulkoasua entistä paremmaksi.

Haluan lisäksi kiittää äitiäni tukemisesta ja ymmärtämisestä diplomityön teon aikana ja elämässäni yleensä, sekä isääni, jolta olen alunperin saanut kipinän tieteen ja tekniikan pariin. Kiitoksen ansaitsevat myös rakkaat isovanhempani, mummini Lea ja isoäitini Aili, jotka ovat opettaneet minulle kärsivällisyyttä, jota tämä työ on vaatinut. Haluan myös kiittää Jannea, joka on tuonut piristävällä olemuksellaan energiaa päiviini, jotta olen ollut parhaimmillani diplomityötä tehdessäni. Lopuksi haluan kiittää vielä kaikkia ystäviäni, kollegoitani sekä sukulaisiani, jotka ovat tukeneet minua tässä projektissa sekä yleisesti koko opiskelujeni aikana.

Sisällysluettelo

1 Johdanto	1
2 Elektroniikkatuotteen komponentit ja prosessit	3
2.1 Elektroniikan pakkaaminen ja kokoonpano	3
2.1.1 Sirujen pakkaamisen tarkoitus	4
2.1.2 Nollatason pakkaaminen	5
<i>Resistiivinen lämpötila-anturi</i>	6
2.1.3 Ensimmäisen tason pakkaaminen	8
<i>Flip chip –pakkausteknologia</i>	10
<i>Adhesiiviliittäminen</i>	13
2.2 Elektroniikan pintakäsittelyt	15
2.2.1 Pintakäsittelyn perusvaatimukset	15
2.2.2 Suojapinnoitusprosessi	16
<i>Maskaus</i>	16
<i>Pinnan puhdistus</i>	16
<i>Pinnan ja pinnoiteaineen valmistelu</i>	17
<i>Kuivatus ja kovetus</i>	19
2.2.3 Polyuretaanit	20
2.2.4 Akryylit	20
2.3 Testaus ja tarkastukset	21
2.3.1 Sähköinen testaus	21
Resistiivisen lämpötila-anturin toiminnan testaus	22
2.3.2 Visuaalinen tarkastaminen	22
2.4 Kustannusanalyysi	23
2.4.1 Työvoimakustannukset	23
2.4.2 Materiaalikustannukset	23
2.4.3 Työstökustannukset	24
2.4.4 Kalustokustannukset	24
2.4.5 Kokonaiskustannukset	24
2.4.6 Kapasiteetti	24
2.5 Tilastollinen prosessinohjaus	25
2.5.1 Prosessien materiaali- ja työhukka	26
2.5.2 Matemaattinen termistö	27
2.5.3 Seurantakaavio	28
2.5.4 Frekvenssi, histogrammi ja paretokaavio	30
2.5.5 Vaihtelu prosesseissa	32
2.5.6 Vaihtelun havaitseminen ja siihen reagointi	33

2.5.7 Six sigma –laatu­taso	34
3 Tutkimusmenetelmät ja -aineisto	37
3.1 Tutkimuksen kohteena oleva tuotantoprosessi	37
3.2 Tuotantoprosessiketjun testaukset, tarkastukset ja vialliset tuotteet.....	40
3.2.1 Komponenttitestaus	40
3.2.2 Funktionaalinen testaus ja jälkitarkastus	41
3.2.3 Visuaalinen tarkastus	42
3.3 Minitab-ohjelmisto.....	42
3.3.1 Toistettavuus ja uusittavuus –tutkimus (Gage R&R –tutkimus)	43
3.4 Kustannusanalyysi	44
4 Tulokset	47
4.1 FT-testauksen hylätyt yksiköt ja niiden juurisyyt.....	47
4.1.1. Ensimmäinen testausjakso	47
4.1.2. Toinen testausjakso	49
4.2 FT-testauksen Gage R&R –tutkimus.....	54
4.3 Visuaalinen tarkastus, sen saannon kehitys ja suurimmat vikasyyt.....	58
4.4 Kustannusanalyysi	61
4.4.1 Prosessiketju 1	61
4.4.2 Prosessiketju 2	63
5 Pohdinta ja johtopäätökset	65
5.1 FT-testauksen hylätyjen yksiköiden alkuperä	65
5.2 Funktionaalinen testaus ja sen luotettavuus.....	68
5.3 Visuaalinen tarkastus ja siinä kiinnijäävät hylkäyssyyt.....	70
5.3.1 Pinnoitus 1	70
5.3.2 Pinnoitus 2	71
5.3.3 Epäonnistunut leikkaus 1 ja anturin vioittuminen	73
5.4 Kustannusanalyysi	73
Lähteet	75
Liitteet.....	79

1 Johdanto

Elektroniikkateollisuudessa saannon, eli toimivien tuotteiden osuuden kaikista tuotetuista tuotteista, korkea taso turvaa sen, että valmistajan resurssit sitoutuvat tuottavaan kohteeseen eli toimiviin laitteisiin. Jatkuva viallisten tuotteiden tuottaminen tuhlaa valmistajan resursseja puhumattakaan materiaaleista ja raaka-aineista. Kilpailun ollessa alalla kova saantotasot määrittelevät pitkälti koko liiketoiminnan kannattavuutta ja tähtäimenä suurimmalla osalla alan yrityksistä onkin sataprosenttinen saanto. Sadan prosentin saannon saavuttaminen on hyvin vaikeaa, ellei jopa mahdotonta, ja tavoitteen saavuttamisen tueksi on kehitetty monenlaisia menetelmiä. Eräs näistä on tilastollinen prosessinohjaus, jossa saantotasoa seurataan ja tilastoidaan jatkuvasti. Prosessien toimintaan puututaan välittömästi, kun tietyt ehdot saannon tason muutoksissa täyttyvät.

Elektroniikkalaitteiden valmistus on monivaiheinen prosessi, jossa monien eri alojen ja osastojen ammattilaiset tekevät yhteistyötä. Monivaiheisuuden vuoksi tuotteita testataan ja tarkastetaan useissa kohdissa valmistusprosessikokonaisuutta. Tällä estetään lisäresurssien sitoutuminen jo valmiiksi viallisiin tuotteisiin.

Tämä diplomityö esittelee elektroniikkalaitteen tuotannon prosessiketjun sekä analysoi saantoon merkittävimmin vaikuttavia prosessivaiheita ja niiden potentiaalisia kehityskohteita. Prosessien saantoja tutkitaan automatisoitua tilastollista tiedonkeruuta hyödyntämällä. Tuotannon eri vaiheissa vikaantuneita tai vialliseksi havaittuja tuotteita tutkitaan muun muassa sähköisillä mittauksilla ja optisilla menetelmillä. Tarkoituksena on löytää tuotteen vian juurisyy sekä yhdistää se prosessiin, joka sen aiheuttaa. Kehitystä kaipaavia prosesseja löydettiin useita, ja erääseen pinnoitusprosessiin tehtiin käytännön muutos ottamalla viallisia työvälineitä pois käytöstä, jonka myötä vikaantuneiden tuotteiden määrää saatiin vähennettyä miltei kymmenesosaan alkuperäisestä vikaantuneiden määrästä. Tämän lisäksi tunnistettiin muita vikaantumisen aiheuttavia prosesseja. Näihin neljään suurimpaan vikaantumista aiheuttavaan prosessiin perustuen tehtiin kustannusanalyysi, jonka tulosten perusteella näiden prosessiongelmiä eliminoimisella voidaan päästä 70-80% kustannussäästöihin hukkakustannuksien suhteen. Muutoksia prosesseihin suunnitellaan, mutta testejä täytyy vielä suorittaa ennenkuin muutokset implementoidaan tuotannon tasolla.

Diplomityön Kirjallisuus-osiossa esitellään elektronisen laitteen valmistuksen tyypillisiä vaiheita, kuten eri tasojen pakkaamista, pintakäsittelyjä sekä testauksia ja tarkastuksia.

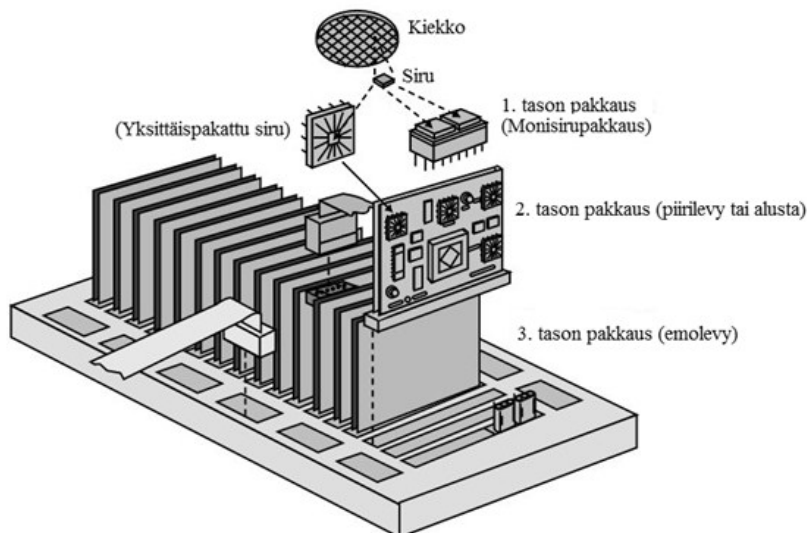
Kustannusanalyysi esittelee, mistä kustannukset koostuvat tuotantoprosessissa. Tilastollisen prosessinohjauksen käsite esitellään, samoin kuin siihen perustuvat työkalut, jotka ovat laajalti käytössä prosessinohjauksen kannalta edelläkäyvissä yrityksissä. Tutkimusmenetelmät ja -aineisto -osiossa läpikäydään diplomityössä käytetyt menetelmät ja Tulokset -osiossa esitellään tutkimuksen kannalta merkittävimmät löydökset. Pohdinta ja johtopäätökset -osiossa tulokset tulkitaan ja tunnistetaan syy-seuraus -suhteet prosessiongelmiin sekä tuotteessa ilmenevien vikojen välille. Tämän lisäksi viimeisessä osiossa ehdotetaan prosessiin tehtäviä muutoksia, lisätutkimuksen kohteita sekä pohditaan jo tehtyjen muutosten onnistumista ja merkittävyyttä.

2 Elektroniikkatuotteen komponentit ja prosessit

Tässä osiossa esitellään työn kannalta oleelliset käsitteet ja kokonaisuudet. Ensimmäisenä kokonaisuutena esitellään elektronisten laitteiden pakkaaminen sekä kokoonpano. Tässä kokonaisuudessa kerrotaan erityisesti elektroniikan pakkaamisen eri tasoista, jona kokoonpano voidaan käsittää. Pakkaamisen yhteydessä tarkastellaan tarkemmin flip chip -liitosteknologiaa. Sen jälkeen kerrotaan elektroniikan laitteiden eri osille tehtävistä pintakäsittelyistä, lähinnä suojapinnoitusprosessista, sekä esitellään muutama yleinen suojapinnoitusmateriaali. Tämän jälkeen käsitellään laadunvalvonnan välineitä eli testauksia ja tarkastuksia, joista pääosassa ovat sähköiset testaukset sekä visuaalinen tarkastus. Tämän jälkeen perehdytään kustannusanalyysiin sekä tilastolliseen prosessinohjaukseen. Kustannusanalyysissä tarkastellaan miten elektroniikkalaitteen valmistuksen kustannukset rakentuvat. Tilastollisessa prosessinohjauksessa esitellään kyseisen aihealueen peruskäsitteet sekä nykypäivän elektroniikan tuotannossa käytettäviä työkaluja, joiden avulla saantotasoa valvotaan.

2.1 Elektroniikan pakkaaminen ja kokoonpano

Jokainen elektroninen laite muodostuu siruista ja eri tasojen pakkauksista. Sirut voivat olla piistä, keraamista, lasista tai jostain muusta materiaalista valmistettuja. Sirut ja eri tason pakkaukset voidaan esittää pakkaamisen hierarkiana¹, ja sitä havainnollistetaan



Kuva 1, Elektronisen laitteen pakkaamisen hierarkia [muokattu lähteestä 1]

Sirut ovat puolijohdeyksikköjä tai ohutkalvovyksikköjä kuten mikropiirejä tai antureita. Ensimmäisen tason pakkaus integroi nämä yksiköt yhteen tai erikseen, pakkaukset voivat siis sisältää joko yhden tai useamman sirun. Näitä pakkauksia kutsutaan yksittäispakatuiksi siruiksi tai monisirupakkauksiksi. Toisen tason pakkauksessa yhdistellään monisirupakkauksia tai yksittäispakattuja siruja piirilevyille. Käytetään jatkossa näistä toisen tason piirilevyistä selvyuden vuoksi termiä ”alusta”. Emolevyt integroivat toisen tason pakkaukset, eli alustat, systeemitason kokoonpanoiksi, jotka sisältävät kaikki systeemin tarvitsemat toiminnallisuudet². Tätä kutsutaan kolmannen tason pakkaamiseksi. Elektroniikan tuote voi koostua kaikista yllämainituista pakkaustasoista tai jokin taso voi puuttua.

Elektroniikan pakkaaminen voidaan jakaa siis kolmeen tasoon eli ensimmäiseen tasoon, toiseen tasoon ja kolmanteen tasoon, kuten kuvassa 1 on esitetty. Jokainen pakkaustaso hidastaa signaalin etenemistä, kuten tekevät myös johtimien pituudet. Eräs pakkaamisen tavoitteista onkin saavuttaa systeemille suoritusteho, joka on mahdollisimman lähellä sirujen suoritustehoa systeemin luotettavuudesta tinkimättä. Käytännössä kuitenkin sirutasolla signaaleja prosessoidaan 10^{12} Hz taajuudella, kun taas lopullisessa systeemissä, kuten tietokonetasolle siirryttäessä, taajuus on enää tuhannesosa tästä.³

Tässä diplomityössä keskitytään ensimmäisen ja toisen tason pakkauksessa lähinnä flip chip -pakkausteknologiaan, vaikka sen lisäksi varsinkin lankaliittäminen on hyvin yleinen pakkausmenetelmä elektroniikassa näillä pakkaustasoilla. Pakkaamisen tarkoitus, pakkaustasot nollatasosta eteenpäin sekä elektroniikan pintakäsittelyt selostetaan yleisellä tasolla tarkemmin alla. Lisäksi myöhemmin työssä käsittelyssä ovat mikrosiruista nimenomaan anturit, joten jatkossa käytetään usein termiä anturi, mutta yleisesti anturin tilalla voisi yhtä hyvin olla toisenlainen mikrosiru.

2.1.1 Sirujen pakkaamisen tarkoitus

Siruilla tarkoitetaan kiekosta sahattuja komponentteja, jotka sisältävät kiekolle prosessoituja rakenneosia. Eräänlainen siru on esimerkiksi ohutkalvoanturi tai MEMS, eli mikroelektromekaaninen systeemi. Ohutkalvoanturit voivat rakentua esimerkiksi keraamisubstraatista ja ohutkalvoteknologian avulla valmistetuista rakenneosista, kuten vastuksista. Tällaista sirua yhdessä siihen liitettävän elektroniikan kanssa voidaan hyödyntää esimerkiksi lämpötilaa mittaavissa laitteissa. MEMS:t rakentuvat erilaisista kalvo- ja palkkirakenteista ja ne valmistetaan usein piistä. Tällaisia siruja ovat esimerkiksi

MEMS-resonaattorit, joita käytetään painetta tai liikettä havaitsevista mittareista. Pakkauksen tehtävänä yleisesti on suojata, tuoda virtaa ja jäähdyttää siruja sekä luoda sähköinen ja mekaaninen kontakti sirun ja ulkomaailman välille.¹

Sekä MEMS että ohutkalvoanturi keräävät tietoa ympäristöstä systeemiin. Sirun ja sen käyttökohteen ympäristön rajapinta on otettava huomioon pakkaamista suunniteltaessa. Tästä esimerkkinä lämpötilaa mittaava laite, jonka lämpötilaa havaitsevan anturin on oltava kosketuksissa mitattavaan kohteeseen. Toisenlaisena esimerkkinä taas paineanturi, jonka on oltava täysin eristettynä ympäristöstä muun muassa kontaminoivien hiukkasten ja kosteuden vuoksi. MEMS:ien tapauksessa rajapinta voi olla myös esimerkiksi biolääketieteellinen, jolloin elementti voi joutua kosketuksiin esimerkiksi elävän kudoksen kanssa. Tällöin se tulee suojata pakkauksen avulla asiaankuuluvalla tavalla. Sen tulisi olla kemiallisesti stabiili, se ei siis saisi reagoida sitä ympäröivän nesteen tai kosteuden kanssa eikä se saisi vahingoittaa ympäröivää kudosta. MEMS:n tapauksessa pakkauksen tulee tarjota MEMS-elementille eristys, maadoitus sekä suojaus.⁴

Mikrosirujen pakkaamisessa keskeisimpiä käytettyjä materiaaleja ovat adhesiivit sirujen liittämiseen, metallilangat ja -nystyt sähköisten kontaktien luomiseksi sekä erilaiset polymeeriyhdisteet mikrosirun kotelointiin. Mikrosirujen luotettavuus ja elinikä määrittävät käytännössä sen mukaan, mitkä tekijät aiheuttavat sen toiminnan vikaantumisen, ja kuinka hyvin pakkaus estää näiden tekijöiden ilmaantumisen.⁵ Esimerkiksi vallitsevan ympäristön olosuhteita mittaava laite saattaa altistua suurille lämpötilan muutoksille, mistä johtuen esimerkiksi mittaavan anturielementin ja piirilevyn, jolle se on pakattu, välille voi syntyä suuria termisiä jännityksiä. Pakkaus yhdistää mikrosirun ja alustan ja sen yksi tärkeimmistä tehtävistä onkin tasoittaa tällaista syntynyttä jännityskenttää. Mikäli pakkaus ei ole riittävän luja, anturi saattaa irrota alustasta ja mittauslaitteesta tulee käyttökelvoton. Toisaalta taas sama laite voi joutua tärinän alaiseksi erilaisissa kuljetuksissa. Pakkauksen tulee siis kestää myös esimerkiksi tärinää.

2.1.2 Nollatason pakkaaminen

Nollatason pakkaaminen suoritetaan kiekkoalasella siruja valmistettaessa tehtaalla ja siinä rakenneosia suojataan jo sirun valmistusprosessin yhteydessä.⁶ Antureiden ja muiden sirujen valmistaminen sirutasolla ja pakkaaminen seuraavilla tasoilla on monivaiheinen prosessi. MEMS:t ja anturit valmistetaan fotolitografisten prosessien avulla erilaisille

substraateille, kuten piikiekoille, alumiinioksidikiekoille tai lasikiekoille. Kun mikrosysteemit on valmistettu kiekkoille, ne sahataan erillisiksi yksittäisiksi elementeiksi eli siruiksi. Kiekot asetetaan aluksi teippialustalle, joiden päällä ne sahataan, tällöin sahatut mikrosirut jäävät kiinni ehjään teippialustaansa. Sahat ovat usein timanttikomposiittimateriaalista valmistettuja. Sahaus suoritetaan kiekkoon merkittyjä katkoviivoja seuraten.

Resistiivinen lämpötila-anturi

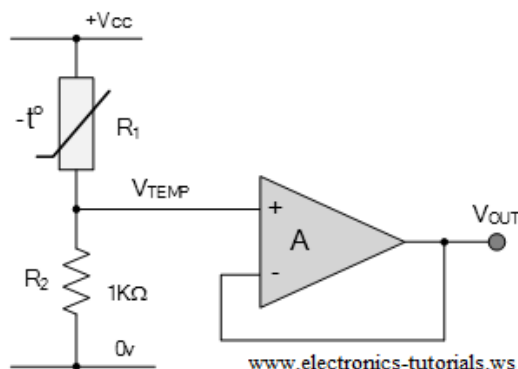
Nollatason pakkaamisen tuloksena syntyy siru. Esimerkki tällaisesta on resistiivinen lämpötila-anturi (*resistive temperature detector*, RTD). Sen toiminta perustuu nimensämukaisesti anturin johdinrakenteen resistanssiin. Johtimen resistanssi määrittyy kaavan 1 mukaan.⁷

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (1)$$

Kaavassa 1 ρ on johtimen materiaalin resistiivisyys, L on johtimen pituus ja A on johtimen poikkipinta-ala.

Tarkemmin sanottuna RTD:een syötetään jännitelähteen avulla virtaa ja se, kuinka paljon jännite laskee, kertoo resistanssin suuruuden.⁸ Lämpötila-anturi on siis vastus, jonka materiaali on usein stabiilia metallia.⁹ Kuvassa 2 lämpötila-anturi on merkitty vastuksena R_1 .

RTD:n toimintaperiaate on kuin lämpötilariippuvaisen vastuksen (engl. *thermistor*). Kaavakuva mahdollisesta lämpötilariippuvaisen vastuksen kytkennästä on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2, Lämpötilariippuvaisen vastuksen esimerkkikytkentä lämpötilamittauksessa

Kuvassa 2 on kaksi vastusta, vastukset R_1 ja R_2 . Vastus R_2 on lämpötilariippumaton yhden kilo-ohmin vastus ja R_1 resistanssi vaihtelee lämpötilan mukaan.¹⁰ Tässä kuvassa $-t^\circ$ -merkintä viittaa tässä tapauksessa vastuksen olevan negatiivisesti lämpötilasta riippuvainen. Kyseisessä kytkennässä jännitelähteen $+V_{cc}$ jännite on tunnettu samoin kuin vakiovastuksen R_2 resistanssin suuruus. Mittaamalla ulostulevaa jännitettä V_{out} voidaan ratkaista kytkennän lämpötilariippuvaisen vastuksen R_1 resistanssin suuruus kaavaan 2 perustuen¹⁰ ja lopulta kaavan 3 mukaisesti.

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{cc} \quad (2)$$

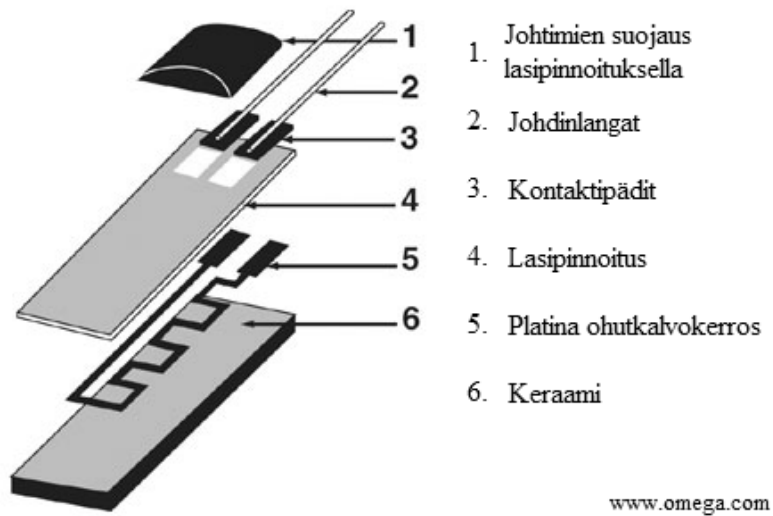
$$R_1 = \frac{R_2 V_{cc} - R_2 V_{out}}{V_{out}} \quad (3)$$

RTD:n johdinmateriaaliksi valitaan materiaali, jonka resistanssin vaste lämpötilan suhteen on lähellä lineaarista. Yksinkertaistaen lämpötilan mittaaminen perustuu kahden mittapisteen resistanssin arvoon, joiden avulla voidaan rakentaa malli resistanssin ja lämpötilan väliselle suhteelle.¹² Kaavassa 4 on esitetty niinsanotun alfan, α , määrittäminen, joka on siis käytännössä mallin kulmakertoimen arvo.

$$\alpha = \frac{R_{100^\circ C} - R_{0^\circ C}}{R_{0^\circ C} * 100^\circ C} \quad (4)$$

Kaavassa 4 arvot $R_{X^\circ C}$ on resistanssin arvo tietyssä lämpötilassa. Alfa ja kahden pisteen avulla voidaan rakentaa lineaarinen esitys vastuksen resistanssin suhteesta lämpötilaan. Usein mallia tarkennetaan käytännössä muuntamalla ensimmäisen kertaluvun polynomi kolmannen kertaluvun polynomiksi, jota kutsutaan Callendar-Van Dusen -yhtälöksi ja käyttämällä siinä korjaavia, niinkutsuttuja Callendar-Van Dusen -kertoimia.¹² Lisäksi johtimet piirissä, johon anturi liitetään, kontribuoivat resistanssin muutoksen lukemiin, mutta tämä efekti voidaan eliminoida sopivilla piirikytkennöillä.¹²

Kuvassa 3 on esitetty RTD:n periaatteellinen rakenne.¹¹



Kuva 3. Resistiivisen lämpötila-anturin periaatteellinen rakenne [kopioitu lähteestä 10]

Varsinaisen kokonaisen lämpötilamittalaitteen toimintaan tarvitaan anturin lisäksi muitakin komponentteja. Eräs perustavanlaatuinen mittaussysteemi koostuu jännitelähteestä sekä niinkutsutusta vakaasta kuormitusvastuksesta, jonka resistanssi on huomattavasti mittaavaa vastusta suurempi.⁹ Tällöin piirissä virtaava virta on lähes vakio, sillä suurin osa piirin resistanssista on vakio, joten voidaan olettaa, että jännite mittaavan vastuksen yli on verrannollinen mittaavan vastuksen resistanssiin.⁹ Resistiivisiä lämpötila-antureita käytetään muun muassa autoissa, uuneissa, jääkaapeissa ja tietokoneissa.¹³ Ne ovat toiminnaltaan vakaita eivätkä ne ole juurikaan reagoi ympäristön kanssa. RTD:n vastukset valmistetaan ympäristön olosuhteiden suhteen stabiileista materiaaleista kuten platinasta, volframista tai kuparista.

2.1.3 Ensimmäisen tason pakkaaminen

Kun nollatason pakkaustasolla kokoluokat ovat alle mikrometrin tai mikrometrien luokassa, ensimmäisen pakkaustason kokoluokka on kymmenistä mikrometreistä tuhansiin mikrometreihin.³ Ensimmäisen tason pakkaaminen tarkoittaa kiekosta sahatun mikrosirun pakkaamista seuraavaan kokonaisuuteen, joka on monessa tapauksessa sirun yksittäispakkaus. Yksittäispakkauksessa mikrosiru liitetään pakkauksessa olevan rungon, eli substraatin, päälle. Vaihtoehtoisesti siru voidaan liittää osaksi monisirumoduulia, jolloin substraatille voidaan liittää esimerkiksi anturi ja sen lukupiiri. Pakkaaminen voidaan suorittaa monella eri tavalla, joista eräs on flip chip –pakkaaminen, joka takaa korkealaatuisen pakkauksen korkeita tehokkuuksia vaativille sovelluksille.

Mikrosirun luonteesta ja sovelluksesta riippuen se voidaan pakkauksessa esimerkiksi koteloida hermeettisen suojauksen saavuttamiseksi, kuten paineanturin tapauksessa. Jotkin anturit taas vaativat suoran kosketuksen ympäristöön, kuten RTD:n tapauksessa tai kosteusanturin tapauksessa. Tällöin anturia ei tietenkään voida pakata täysin eristettyyn kotelomuotoon.

Pakkaamisessa käytettävien materiaalien on täytettävä mikropiirien asettamat vaatimukset esimerkiksi sähkönjohtavuudessa ja sirun suojaamiseen tarvittavissa mekaanisissa ominaisuuksissa. Pakkaamisessa käytetään kiekkojen prosessointiin verrattuna laajemmin erilaisia materiaaleja, sillä niillä on hyvin erilaisia funktioita. Pakkausmateriaalin tehtävä voi olla sähkönjohtamisen lisäksi johtaa lämpöä pois lämpöviemärinä, tukea rakennetta mekaanisesti tai suojata sisältönä olevaa mikrosirua.³

Kaavassa 5 on esitetty signaalin etenemisen viiveajan riippuvuus langan tai johtimen resistanssista, kapasitanssista ja pituudesta.¹⁴

$$\tau = RCL^2 \quad (5)$$

Kaavassa 5 τ on signaalin etenemisen viiveaika, R on langan resistanssi, C on langan kapasitanssi ja L on langan pituus. Kaavasta käy selkeästi ilmi, että signaalin viiveaika on suoraan verrannollinen langan pituuden neliöön, joten johtimen pituuden kasvattaminen kasvattaa signaalin viiveaikaa.

Prosessointilämpötilat ensimmäisessä pakkausvaiheessa ovat yleensä muutama sata celsius-astetta. Ensimmäisen tason pakkaaminen toteutetaan yleensä matalan tason puhdistiloissa ja siihen tarvittavat materiaalit, kuten adhesiivit ja juotosnystyt tilataan usein ulkoiselta valmistajalta.

2.1.4 Toisen ja kolmannen tason pakkaaminen

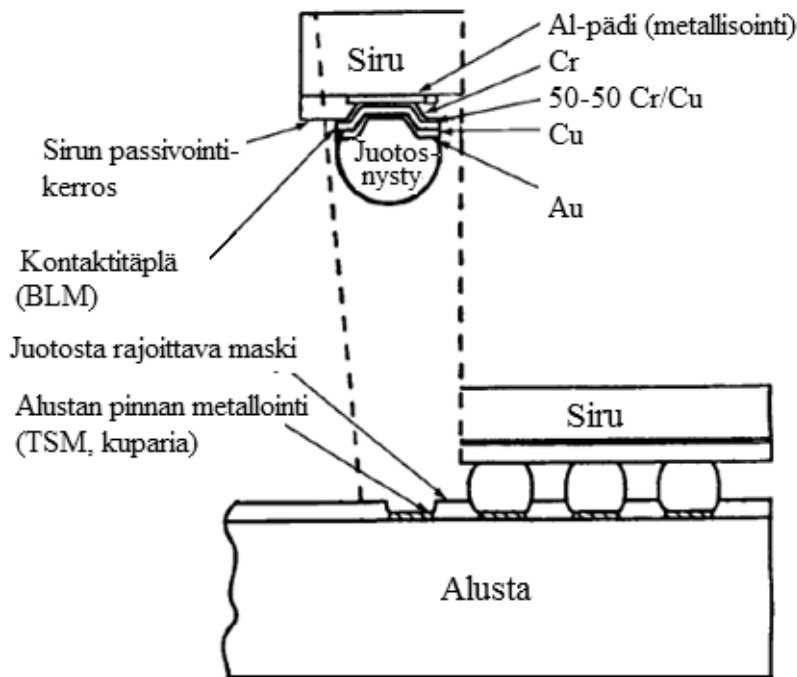
Toisen tason pakkaamisessa yksi tai useampi ensimmäisen tason sirupakkaus yhdistetään alustalla, joka voi olla esimerkiksi piirilevy.⁷ Yhdistäminen voidaan tehdä pin/socket-teknologialla, jolloin liitos on helposti purettavissa korjausta tai irrottamista varten. Toinen yhdistämismenetelmä on juottaminen. Siinä eri pakkaustasot yhdistetään juotteiden avulla. Juotteilla on matala sulamislämpötila, yleensä 425°C tai pienempi.⁴

Kolmannen tason pakkaamisessa tarkoitetaan sitä, että toisen tason pakattuja tuotteita, eli alustoja, yhdistellään emolevylle (engl. *mother board*).

Flip chip –pakkausteknologia

Flip chip –tekniikka asettuu pakkaamisen hierarkiassa ensimmäiselle tai toiselle pakkaustasolle. Tässä liitosteknologiassa anturi tai monisirupakkaus asetetaan alla olevalle substraatille rakenne- ja kontaktipuoli alaspäin. Flip chip –tekniikan periaatteena on, että sirun ja substraatin kontaktikohtien välillä on juotosnystyt, jotka yhdistävät komponentit sähköisesti. Usein liitosta vahvistaa pakkausadhesiivi. Sirun kontaktikohtaa, jonka juotos kostuttaa, sanotaan kontaktitäpläksi tai pädiksi (BLM, *ball limiting metallurgy*). Tekniikka perustuu juottamiseen, termokompressioliitännään ja adhesiiviliitännään, kun puhutaan niinkutsutusta ”no flow” –tekniikasta.¹⁵

Flip chip –pakkauksen perinteinen rakenne kerroksineen on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4, *Flip chip -liitoksen rakenne [muokattu alkuperäisestä lähteestä 14]*

Flip chip –tekniikan sanotaan olevan itsekohdistuva, sillä sulaneen juotoksen pintajännitys kohdistaa mikrosirun alustalleen.¹⁵ Sirut voivat olla jopa miltei 50% vinossa alustan päidin keskikohdasta, ja juotoksen sulaminen kohdistaa sirun kohdalleen.¹⁵

Flip chip –tekniikkaa käytetään korkean tehokkuuden elektronisissa sovelluksissa.³ Sitä suositaan erityisesti alhaisen resistanssinsa, kapasitanssinsa sekä induktanssinsa vuoksi.¹⁶ Tekniikan käyttäminen myös kuluttajaelektronikassa on lisääntynyt viime vuosina.¹⁷

Kontaktitäplät eli pädit

Sirun pinnalla juotosnystyn alla olevan kontaktitäplän (engl. *contact pad*), eli pädin, tehtävä on tuottaa matalan resistanssin kontakti nystyltä siruun.¹⁵ Pädit määrittelevät juotokontaktin koon ja pinta-alan.¹⁸

Eräs pädin perinteinen rakenne sisältää alimpana kerroksena alumiinia ja sen päällä on kolme ohutkalvometallikerrosta. Alimmaisena kerroksena alumiinia päällystää kromikerros, joka tarrautuu alumiiniin, jotta juottaminen on mahdollista. Seuraavana kerroksena on kuparikerros, joka toimii juottamisen pohjana. Kuumennettaessa, eli juoksettamisprosessissa, nystyn ja metallikerrosten välille syntyy monimutkaisia lejeerinkejä. Kuparin päälle kerrostetaan vielä kultaa, joka estää kuparin hapettumisen.¹⁹ Mikäli kupari hapettuu, juotoksen kustutuskulma suurenee. Tästä syystä juotos ei kustuttaisi kontaktitäplää tehokkaasti, jolloin kontakti on huonompi ja epäluotettavampi. Alusta, jolle siru nystyineen liitetään sisältää myös oman pädinsä. Alustan pädin rakenne ja materiaali riippuu alustan materiaalista, sillä alusta voi olla materiaaaliltaan esimerkiksi keraamia, lasia tai polymeeriä.

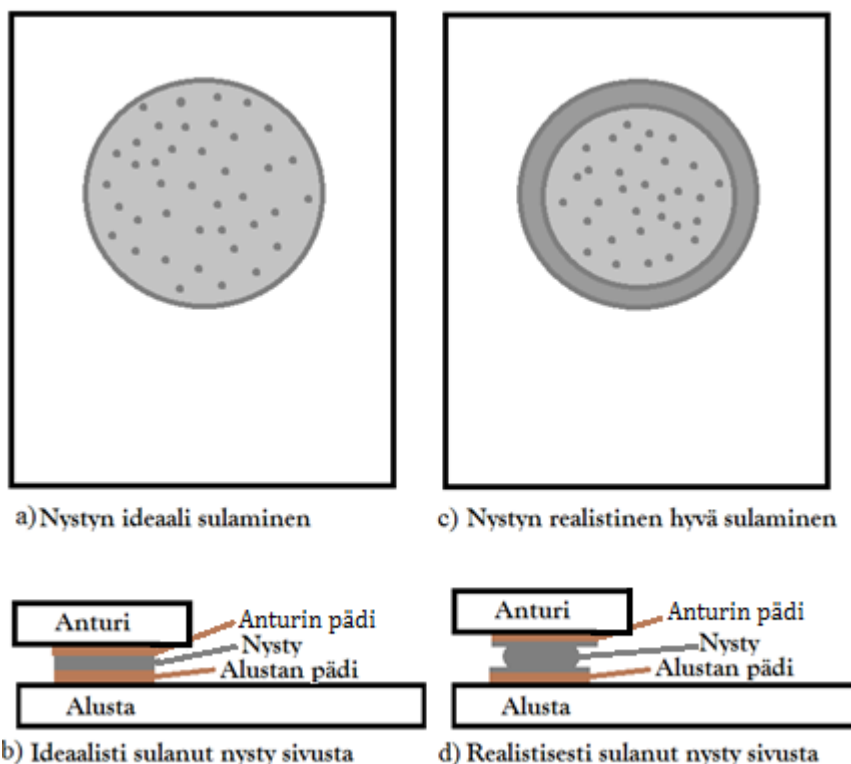
Anturikiekon nystyttäminen ja niiden sulaminen

Nystyt voidaan prosessoida anturikiekoille monin eri tavoin. Näitä ovat esimerkiksi galvanointi, höyrystäminen ja valmiiden juotosnystyjen liittäminen.¹⁵ Valmiit juotonystyt ovat metallipalloja, jotka voidaan liittää kiekolle automatisoidusti nyppimällä pallo säiliöstä, kastamalla se sulatusaineeseen eli fluksiin, asettamalla se haluttuun kohtaan ja juoksuttamalla nysty paikoilleen nostamalla lämpötilaa. Juotospallot voidaan myös ampua suoraan kiekolle suuttimen lävitse, mutta prosessin kontrollointi ei ole helppoa.¹⁵ Pac tech kertoo kuitenkin laserjuottamisprosessistaan, joka perustuu siihen, että nystytyslaitteiston putken, eli niin sanotun kapillaarin, lävitse ammutaan juotospallo laserin samalla sulattaessa sen.²⁰ Prosessi suoritetaan inertissä kaasuympäristössä. Teknologian hyvä puoli on, että fluksille ei ole tarvetta. Nystyttämisprosessissa ei myöskään synny mekaanista kontaktia eikä siitä johtuvia jännityksiä, lisäksi juotosnystyä ei tarvitse enää juoksuttaa nystyn muodostumista ja kiekolle liittämistä varten.²⁰ Pac tech kertoo myös nystyjen poistamisen tai uudelleentyöstämisen olevan mahdollista. Kyseistä teknologiaa voidaan käyttää myös lyijyttömiin juotoksiin.²⁰

Flip chip -teknologiassa anturiin liitetyt nystyt ovat keskeisessä asemassa. Ne ovat johtavia kolmiulotteisia kontakteja anturin ja alustan välillä.¹⁶ Nystyjen materiaalina käytetään metalliseoksia kuten tinalyijyseosta. Nykyään lyijyttömät vaihtoehdot

kasvattavat suosiotaan tiukentuvien EU-säädösten myötä, kuten RoHS-direktiivin (engl. *The Restriction of the use of certain Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*) myötä. Lyijyttömissä juotteissa käytetään muun muassa indiumia matalan sulamispisteen juotteissa ja korkeamman sulamispisteen juotteet koostuvat esimerkiksi tinan, hopean ja kuparin seoksesta.

Nystyjen sulamisen jälkeistä ulkomuotoa havainnollistetaan kuvassa 5. Kuvassa 5 a) on esitetty nystyn ideaali sulaminen ylhäältäpäin, kun se on kuvan 5 b) mukaisesti tasaisesti täysin litistynyt alustan ja anturin päiden väliin kostuttaen molemmat pinnat täysin. Kuva 5 a) havainnollistaa sitä, miltä nysty näyttäisi, jos anturi olisi läpinäkyvä tai jos anturi irroitettaisiin alustasta sulamisen jälkeen. Pisteytetyllä alueella kuvataan sulanutta, alustan pään kostuttanutta juotosta. Kuvan 5 c) kohdassa taas kuvataan reaalin nystyn sulaminen ylhäältä päin. Kuvasta d) voidaan nähdä, että juotosnysty on ennemminkin vain osittain litistynyt päiden väliin, mutta se on kuitenkin kostuttanut molemmat pädit.



Kuva 5, Nystyjen sulaminen anturin ja alustan välillä

Anturin poimiminen ja asettaminen substraatille

Mikropiirin tai MEMS-elementin sisältävän laitteen flip chip -pakkauksessa kriittinen vaihe on elementin poimiminen ja asettaminen haluttuun kohtaan (engl. *pick-n-place*). Usein tämä prosessi suoritetaan voimakkaan mikroskoopin alla joko manuaalisesti tai

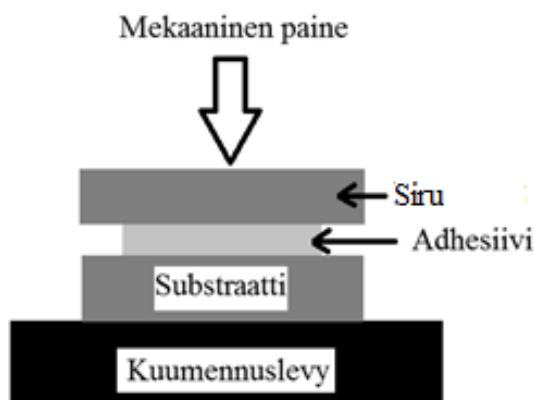
tietokoneen avulla automatisoidusti. Luonnollisesti automaattinen prosessi on manuaalista nopeampi.

Mikroskooppi on olennainen väline prosessissa, sillä paikoilleen asetettavat sirut ovat kooltaan millimetrien kokoluokassa, mutta paikkatarkkuus sirujen asettelulle on mikrometrien luokkaa.²¹

Elementtien asettamiseen tuo haasteita elementtien tarttuminen niitä asettaviin pihteihin tai vastaaviin välineisiin, kun ne haluttaisiin laskea alustalle. Tämä tarttuminen on seurausta elementtien ohuesta geometriasta sekä käytännössä olemattomasta massasta, jonka vuoksi sähköstaattiset sekä van der Waalsin voimat pääsevät vaikuttamaan osien välillä puoleensavetävästi.²¹ Tästä johtuen elementtiä ei ole helppo saada asettumaan tismalleen haluttuun kohtaan.

Adhesiiviliittäminen

Pintojen yhteenliittäminen adheesioilla on erittäin edullinen liitostapa. Se on yleisesti käytössä sirujen liittämiseksi piirilevyille ja alustoihin.⁴ Liitostavan periaate on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6, *Adhesiiviliittämisen periaate*

Kuvassa 6 liitettävä osa voi olla esimerkiksi liitettävä anturisiru ja substraattina on piirilevy tai alusta. Niiden välille lisätään adhesiivianetta. Systeemiä lämmitetään, jotta sopiva liitoslämpötila saavutetaan. Lämmitys voidaan toteuttaa kuvan 6 mukaisesti kuumennuslevyn avulla, tai itse liitoskammio voidaan lämmittää haluttuun lämpötilaan. Liitoslämpötila on usein lähellä adhesiivin lasiutumislämpötilaa, mutta hieman sen alla. Adhesiivi annostellaan substraatin päälle, minkä jälkeen liitettävä siru painetaan adhesiivin päälle. Painetta käytetään liitoksen laadun parantamiseen. Liitos vaatii puhtaan ympäristön, jossa ei ole esimerkiksi pölyä, myös vakuumia voidaan käyttää.

Adhesiivit ovat usein epoksipohjaisia. Adhesiiveilta vaadittavia ominaisuuksia ovat tärähdyksien, tärinän ja termisen kuormituksen kestävyys, lisäksi niiden tulisi sietää korroosiota, korkeita lämpötiloja, vettä ja öljyä.¹⁹ Liitoksen ei haluta olevan liian paksu, joten adhesiivin viskositeetin on hyvä olla riittävän matala. Adhesiivin tulisi tarjota myös hyviä mekaanisia ominaisuuksia leikkausjännitystä sekä erilaisia jännitystiloja kohtaan.¹⁹ Jotta liitos on luotettava, adhesiivin tulee liittyä hyvin liitettäviin osiin. Adhesiivi ei myöskään saisi kutistua tai laajentua suurissa määrin ja sen tulisi tarttua ja kovettua nopeasti.¹⁹

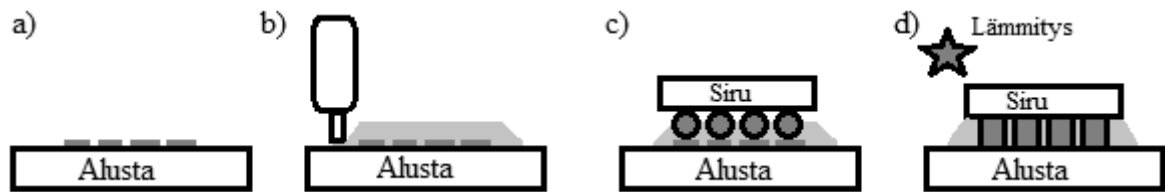
Adhesiivin avulla voidaan liittää erittäin pieniä osia substraatteihin. Tästä johtuen adhesiivin annostelumäärät ovat pieniä, nano- tai jopa pikolitroja. Mikäli annosteltava adhesiivin määrä on liian suuri, sitä leviää juotosalueen ulkopuolelle ja adhesiivi voi vaikuttaa sirujen tai piirilevyn profiilin kriittisiin mittoihin. Toisaalta liian vähäinen adhesiivin määrä tekee liitoksesta epäluotettavan. Adhesiivi syötetään substraatille mikroannostelijan avulla, joihin on liitettynä lämmitin, jotta adhesiivin virtaavuus varmistetaan. Substraatti on liitettynä allaolevaan alustaan, jota voidaan liikutella mikrometrien tarkkuudella, jolloin adhesiivin tarkka annosteleminen paikan suhteen on mahdollista.⁴

Adhesiivien käyttö flip chip -teknologiassa

Adhesiiviliittäminen voidaan yhdistää flip chip -pakkaamiseen, jolloin juotosnystyjen ympärillä oleva tyhjä tila täytetään adhesiivilla. Tällaisia adhesiiveja kutsutaan nimellä ”underfill”. Underfillit ovat yleensä polymeeri-, kuten epoksi-, pohjaisia ja ne sisältävät epäorgaanisia partikkeleita, kuten piioksidia.²³

Adhesiiveja käytetään usein flip chip -liittämisen yhteydessä, sillä pelkkä juotokontakti sirun ja alustan välillä voi olla lujuudeltaan riittämätön. Underfill-materiaaleja käytetään, jotta tuote täyttisi toimintavarmuusvaatimukset.²⁴ Perinteisten underfill-prosessien rinnalle, joissa flip chip -liitoksen juotosten ympärille lisätään adhesiivi jälkikäteen, on kehitetty niinkutsuttu ”no flow”-prosessi. ”No-flow” -prosessissa ensimmäisenä lisätään adhesiivi tulevan liitoksen kohdalle alustalle, jonka jälkeen siru liitetään alustalle. Tämä mahdollistaa juotosten ja adhesiivin samanaikaisen lämpökäsittelyn.

No flow -prosessi on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7, No-flow flip chip -liitosteknologian perusperiaate: ensimmäisenä vaiheena underfillin dispensointi, sitten sirun asettaminen haluttuun kohtaan alustaa ja lopuksi liitoksen lämpökäsittely

Kuvan 7 kohdassa a) on esitetty alusta kontaktipädeineen. Kuvassa 7b) pädien päälle, liitoksen haluttuun kohtaan, lisätään underfill. Tämän jälkeen siru asetetaan haluttuun kohtaankuvan c) mukaisesti ja lopuksi liitos lämmitetään kuvan d) mukaisesti. Kuvasta d) voidaan nähdä että samalla, kun underfill juoksettuu, myös juotosnystyt sulavat luoden sähköisen kontaktin sirun ja alustan välille. No flow underfillit sisältävät sulatusaineen eli fluksin.²⁴

2.2 Elektroniikan pintakäsittelyt

Tasaisesti levittyviä polymeeripinnoituksia on käytetty elektroniikan alalla jo 50 vuotta. Alkuaikoina pinnoitusten pääasiallinen tehtävä oli suojata piirilevyjä kosteudelta, käsittelyn aiheuttamalta vahingoittumiselta ja partikkeleilta.²⁵ Tällaisia pinnoituksia kutsutaan suojapinnoituksiksi (engl. *conformal coating*). Nykypäivänä pinnoitukset ovat kehittyneet ja niitä voidaan valmistaa esimerkiksi puolijohtaviksi erilaisten kerrosrakenteiden välille tai tuotteen pinnalle tekemään siitä esteettisemmän näköinen. Sovelluksesta riippuen pinnoitukselta vaaditaan eritasoisia adheesio-ominaisuuksia, termisiä ja sähköisiä toiminnallisuuksia sekä suojauskykyä ympäristöltä, kuten korroosionkestävyyttä.

Pinnoituksen käyttäytymisen ymmärtäminen edellyttää sen polymeerirakenteen ja sen reaktioiden ymmärtämistä. Neljä yleisintä pinnoitetyyppiä koostuvat: 1. polyuretaaneista, 2. epokseista, 3. akryyleista, 4. fenokseista ja 5. silikoneista. Polyuretaanit ja akryylit esitellään tämän osion lopussa tarkemmin.

2.2.1 Pintakäsittelyn perusvaatimukset

Adheesio on perustavanlaatuisin vaatimus pinnoitukselta. Adheesiolla tarkoitetaan pinnoituksen kiinnittymistä pinnoitettavaan kappaleeseen. Pinnoituksen on kestettävä

tuotteen pinnalla varastoimisen sekä käytön aikana. Adheesio riippuu pinnoitteesta, pinnoitusprosessin olosuhteista sekä pinnoitettavan pinnan tilasta.²⁵

2.2.2 Suojapinnoitusprosessi

Suojapinnoitusta lisättäessä tuotteen pinnalle aluksi kohteen osat maskataan, mikäli siinä on osia joiden ei haluta saavan pinnoitusta päälle. Sitä seuraa pinnan puhdistaminen ja pinnan sekä pinnoitusaineen valmistelu. Lopuksi pinnoitus kuivatetaan ja kovetetaan.

Maskaus

Suojapinnoitusta lisättäessä tuotteen pinnalle aluksi tuote maskataan, mikäli siinä on osia joiden ei haluta saavan pinnoitusta päälle.²⁵ Tällaisia osia voivat olla esimerkiksi anturit, joiden halutaan olevan kontaktissa ympäristöön, jotta ne vastaanottavat haluttuja signaaleja. Toinen tilanne, jossa maskeja voidaan haluta käyttää, on tiettyjen piirilevyn tai kortin alueiden juottamista helpottava suojaaminen pinnoitukselta. Mikäli laitteessa on esimerkiksi useita vierekkäisiä juotospisteitä, niiden halutaan pysyvän erillisiä, jottei niiden välille synny johtavia siltoja. Tällöin alueet, joille juotokset halutaan, peitetään suojapinnoitukselta, kun taas alueet, joille juotoksia ei haluta, annetaan pinnoittautua.

Maskaaminen voidaan suorittaa eri tavoin. Maskaaminen voidaan tehdä lisäämällä esimerkiksi anturin haluttuun kohtaan väliaikaisesti maskiainetta, joka poistetaan pinnoitusprosessin jälkeen. Nämä maskiaineet ovat yleisesti nestemäisiä lateksijohdannaisia, jotka ovat vesi- tai orgaanisessa liuotimessa.²⁵ Maskiaine poistetaan usein vedellä tai muulla liuottimella, sen on siis oltava helposti liukeneva.²⁵ Maskaaminen voidaan tehdä myös mekaanisesti, eli peittämällä maskausjigillä anturista haluttu kohta. Tähän liittyy usein tuotteen pinnan painamista, joka pinnoitettavan pinnan on kestävä.

Pinnan puhdistus

Seuraavassa vaiheessa tuotteen pinta puhdistetaan. Puhdistusvaihe on tärkeä paitsi pinnoitteen tarttumisen vuoksi, myös pinnoituslaitteiston toimivuuden kannalta. Partikkelit, ionit ja suolat vaikuttavat negatiivisesti pinnoitteen adheesioon sekä saattavat aiheuttaa siitä johtuen kosteuden imeytymistä, korroosiota ja sähköisiä häiriöitä.²⁵ Tästä huolimatta puhdistusvaihetta usein laiminlyödään tai ei suoriteta ollenkaan. Vaikka täydellinen partikkeleita suojaaminen onkin mahdotonta, voidaan kontaminaatioita välttää suorittamalla pinnoitusprosessi puhtastilassa.²⁵ Puhtastilassa ilma kiertää jatkuvasti HEPA-suodattimien lävitse.²⁶ Lisäksi pinnoitettavien tuotteiden säilyttäminen prosessivaiheiden välissä typpivirtaus-kaapeissa vähentää kontaminaatoriskiä.

Käytettävät kemikaalit ja liuottimet tulisi myös olla puhtaita sekä tarvittaessa suodatettuja.

Yleisesti tavattuja epäpuhtauksia ovat kokoonpanon operaattoreista lähtöisin olevat sormenjäljet, karvat sekä sylki.²⁵ Niiden leviämistä voidaan estää sopivalla pukeutumisella, kuten suojapukujen, käsineiden, hiusverkkojen sekä kasvomaskin käytöllä.²⁷ Pinnoitusvaiheessa sekä myöhemmissä pakkausvaiheissa ilmaantuvat kontaminaatiot eivät ilmene välittömästi niinkuin mikropiirien valmistusprosesseissa, vaan ne aiheuttavat pidemmän aikavälin korroosiota tai myöhemmin ilmeneviä sähköisiä häiriöitä. Tämän lisäksi epäpuhtaudet voivat olla kokoluokkansa puolesta sellaisia, että niitä ei pysty havaitsemaan ilman mikroskooppia. Myöskään esimerkiksi ionijäänteet eivät ole visuaalisesti havaittavissa. Ionit voi kuitenkin havaita huuhtelemalla tutkittavaa pintaa alkoholin ja ionivaihdetun veden seoksella ja mittaamalla seoksen johtavuutta.²⁵ Lisäksi pienet partikkelit on mahdollista ottaa tutkittavaksi huuhtelemalla tutkittavaa kappaletta liuottimella, suodattamalla liuos sekä tutkimalla jäljelle jääneitä partikkeleita. Varsinkin metallipartikkelit ovat erityisen vahingollisia elektronisilla laitteille. Kahden johtimen välille jäänyt metallipartikkeli voi aiheuttaa katastrofaalisen häiriön kuten oikosulun.²⁵

Yleisiä elektroniikkakokoonpanon pinnalta löytyviä epäpuhtauksia ovat kuidut, oksidit, rasvajäämät, metallit ja ioniluonteiset jäämät. Kuidut ovat yleensä peräisin paperituotteista tai vaatetuksesta, oksidit keraamisubstraateista tai metalleista kuten tinasta tai hopeasta.²⁵ Rasvajäämät ovat yleensä peräisin sormenjäljistä ja kosteusvoiteista, metallit ovat usein peräisin metalliosien valmistuksesta, juotosnystyistä tai -roiskeista ja ioniluonteiset jäämät hiestä, sormenjäljistä tai puhdistus- tai etsausliuoksista.²⁵

Pinnan ja pinnoiteaineen valmistelu

Puhdistamisen jälkeen pinta valmistellaan pinnoitusta varten. Kuivaaminen on olennainen osa valmistelua ja se mahdollistaa pinnoituksen hyvän adheesion tuotteen pintaan.²⁵ Varsinkin polymeerituotteita pinnoitettaessa kuivaaminen on erittäin tärkeä vaihe, sillä ne imevät vettä. Pinnalla oleva vesi aiheuttaa huonon adheesion pintaan ja voi synnyttää pinnoitteen alle rakkuloita.²⁵ Kuivaaminen voidaan suorittaa paineistetulla ilmalla tai tyypellä, usean tunnin uunissa lämmittämällä alle 95°C lämpötiloissa tai vakuumiunilämmittämällä. Uunissa lämmittämistä kutsutaan paistamiseksi (engl.

baking). Vakuumpipaisto poistaa veden lisäksi muita kevyitä yhdisteitä, jolloin pinta stabiloituu ja kaasun purkautumiselta välttyään.²⁵ Huonon valmistelun johdosta kaasu voi purkautua pinnalta pinnoituksen lisäyksen jälkeen ja kovettamisen aikana. Hyvällä valmistelulla, esimerkiksi vakuumpipaistolla, voidaan myös välttyä ”popcorning”-ilmiöltä, jossa vettä höyrystyy ja poistuu tuotteen pinnan läpi sitä lämmitettäessä aiheuttaen sisäisiä jännitystiloja sekä säröjä.²⁸ Tämä ilmiö voi tapahtua korkean lämpötilan sulatusjuottamisessa²⁴, jollainen esimerkiksi suoritetaan flip chip –liitoksien valmistuksessa.

Pohjustaminen pohjustuskerroksella (engl. *priming*) helpottaa joidenkin pinnoitusten tarttumista tuotteen pintaan. Epoksipohjaiset pinnoitukset eivät yleensä tarvitse pohjustuskerrosta, mutta silikonipohjaiset pinnoitukset taas tarvitsevat.²⁵ Optimaalisen pohjustuskerroksen tulisi olla hyvin ohut. Pohjustusaineet ovat liuotinpohjaisia ja ilmassa kuivuvia, ne sisältävät vain vähän kiinteitä partikkeleita. Pohjustuskerros voidaan levittää tuotteen pinnalle dippaamalla, suihkuttamalla, sutimalla tai spin-coating –teknologialla.²⁵

Hankaliin pintoihin pinnoitus ei tartu hyvästä kuivaamisesta tai pinnoitusaineen huolellisesta valinnasta huolimatta. Tällaisia pintoja ovat esimerkiksi Teflon sekä kulta ja muut jalometallit. Tällöin turvaudutaan pinnan etsaamiseen, jonka johdosta pinnan kostutuskulma kasvaa. Teflonia etsataan natriumnaftaliini-yhdisteillä, kullan tapauksessa voidaan joutua turvautumaan pinnan abrasiiviseen kulutukseen.²⁵ Pintaa voidaan valmistella myös kemiallisesti, sillä metallipinnoille syntyvät oksidit voivat edistää tai huonontaa pinnoituksen tarttuvuutta. Kuten flip chip –teknologian yhteydessäkin todettiin, kuparipinnan hapettuminen pienentää kostutuskulmaa, jolloin pinnoitus tarttuu ja leviää siihen huonommin. Oksidikerros voidaan kuitenkin poistaa esimerkiksi sopivalla happoliuoksella.

Pinnoitusaineellekin suoritetaan valmistelu ennen sen käyttöä. Aineesta on tunnettava sen varastoinninkestävyys, joka kertoo kuinka kauan aine säilyy avaamattomana säilyttäen kaikki ominaisuutensa.²⁵ Lisäksi työstettävyysaika on tunnettava, joka taas viittaa tuotteen käyttämisikkunaan paketin avaamisesta tai monikomponenttipinnoitteen sekoittamisesta.²⁵ Työstettävyysaika voi olla esimerkiksi epoksisekoitteilla tunteja tai vain minuutteja, joka vaatii hyvän automatisoidun sekoitus- ja levittämislaitteiston. Yksikomponenttisilla pinnoitusaineilla työstettävyysaika ei yleensä koidu ongelmaksi. Varastoinninkestävyydessä puhutaan yleensä vuoden säilymisajoista. Pinnoitusaine on syytä suodattaa ennen käyttöä, sillä sinne voi päätyä partikkeleita operaattoreista sekä

tuotantotilojen välineistöstä.²⁵ Partikkelit voivat aiheuttaa reiän pinnoitukseen. Pinnoitusaineet tulee säilyttää niiden vaatimalla tavalla, esimerkiksi ultraviolettivaloon reagoivat aineet on säilytettävä ruskeissa pulloissa ja prosessoitava keltaisessa valossa.²⁵ Pinnoitusprosessit olisi yleisesti paras prosessoida puhtastilassa.

Kuivatus ja kovetus

Pinnoitusaineet ovat yleensä liuotinpohjaisia, joten ne tarvitsevat kuivatuksen (engl. *curing*) joko huoneenlämpötilassa tai korotetussa lämpötilassa liuottimen haihduttamiseksi. Lisäksi monomeereistä rakentuvat pinnoitteet tarvitsevat korotettua lämpötilaa polymerisoinnin ja silloittumisen tapahtumiseksi.²⁵ Jotkin kahdesta aineesta koostuvat pinnoitteet polymerisoituvat jo sekoituksessa, mutta kaikki pinnoitteet tarvitsevat kuumennuksen, jotta lopullinen kovettuminen tapahtuu. Kuumennus voidaan suorittaa yhdessä lämpötilassa, mutta parempia tuloksia on saatu, kun kuumennus tapahtuu useammassa osassa askeleittain.²⁵ Kun kuumennus aloitetaan matalammista lämpötiloista, kosteudella ja muilla haihtuvilla aineilla on enemmän aikaa poistua pinnoitteesta.

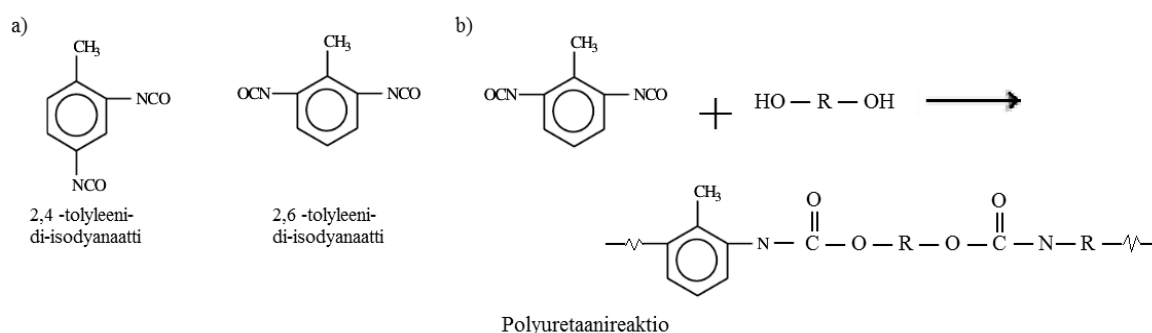
Jotkin pinnoitteet tarvitsevat ilmankosteutta, jotta niiden funktionaaliset ryhmät aktivoituvat, tällaisia ovat esimerkiksi jotkin polyuretaanit.²⁵ Näitä pinnoitteita kutsutaan kosteuskovettuviksi (engl. *moisture curing*) pinnoitteiksi. Usein pinnoitus saavuttaa optimaaliset ominaisuudet, kun se altistuu vähintään 30 prosentin suhteelliselle ilmankosteudelle 24 ja 48 tunnin välisen ajan, tämän jälkeen se kuumennetaan.²⁵ Tästä johtuen kosteuskovettuvien pinnoitteiden prosessoiminen voi olla hankalaa kuivissa ja kuumissa olosuhteissa.

Pinnoitusaineet voidaan kovettaa myös ultraviolettivalon avulla. Ultraviolettikovettuvat pinnoitteet ovat usein akryylijohdannaisia, olomuodoltaan kiinteitä ja koostuvat vain yhdestä komponentista.²⁵ Sillä näiden pinnoitteiden kovettaminen ei vaadi korkeita lämpötiloja, voidaan niitä käyttää myös lämpöherkkien laitteiden pinnoittamiseen. Kovettamiseen tehokkaimmat valon aallonpituudet ovat 250:sta 400:aan nanometriin.²⁵ Valokovettuvien pinnoitusten vahvuuksia on myös kovettamisen nopeus, joka lisää teollisessa tuotannossa tehokkuutta, kun kovettamisprosessin läpimenoaika pienenee.²⁹ Prosessin läpimenoajalla tässä tarkoitetaan aikaa, joka tuotteen prosessoinnin aloittamisesta kuluu prosessin loppumiseen.

2.2.3 Polyuretaanit

Polyuretaanit ovat yksi tärkeimpiä synteettisiä pinnoitteita elektroniikan alalla, niitä käytetään, kun tuotteilta vaaditaan korkean tason luotettavuutta. Oikein prosessoituna polyuretaanipinnoitus tarjoaa lujuutta, joustavuutta, abrasiivista kulutuksenkestävyyttä, eristävyttä sekä kemiallisen ja kosteussuojan.³⁰ Erityisesti kulutuksenkestävyys ja lujuus erottaa polyuretaanit muista synteettisistä pinnoitteista. Lisäksi polyuretaanipinnoitusta voi uudelleentyöstää ongelmatilanteissa. Ne pehmenevät kolvilla käsiteltäessä ja voivat toimia fluksina, jos pinnoitusta on esimerkiksi levinnyt kohtaan, jolle jotain haluttaisiin juottaa.³⁰

Polyuretaanit muodostuvat di- tai polyisosyanaateista, joista yleisimmin käytetty on tolyleenidi-isosyanaatti (TDI). Muutama yleistä TDI:tä on esitetty kuvassa 8 kohdassa a).



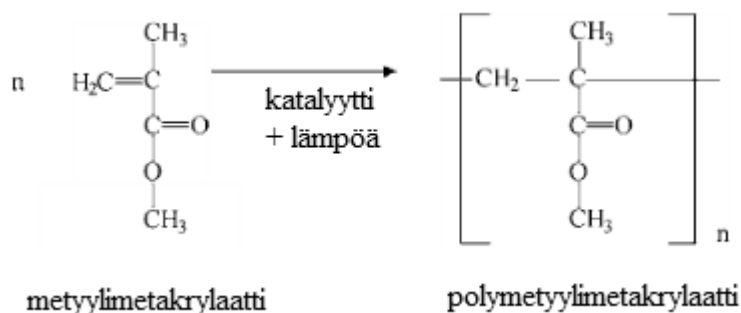
Kuva 8, Tolyleenidi-isosyanaatteja sekä polyuretaanireaktio [muokattu lähteestä 29]

Ureaanireaktiossa isosyanaattiryhmään liittyy hydroksyyli ryhmä, jolloin syntyy ureaanisidos. Reaktio on kuvattuna kuvassa 8 b). Isosyanaatit ovat korkean höyrönpaineen yhdisteitä sekä myrkyllisiä, minkä vuoksi niitä myydään polyolien kanssa koreagoituneessa muodossa, jolloin TDI:n toinen OCN-ryhmä on reagoinut liittyen polyoliin.³⁰ Tällä tavoin yhdisteen höyrönpaine saadaan laskemaan.

2.2.4 Akryylit

Akryylit ovat yleisimmin käytettyjä pinnoitteita piirilevyn suojauksessa. Niissä yhdistyvät edullinen hinta, hyvät sähköiset eristysominaisuudet, helppo korjattavuus sekä kosteuden suojauskyky. Akryylipinnoitteet ovat yleensä polymetyylimetakrylaattipinnoitteita. Polymeerirakenne syntyy metyylimetakrylaattien reagoidessa keskenään ilman ja katalyytin läsnäollessa joko huoneenlämpötilassa tai korotetussa lämpötilassa.³¹

Polymeroitumisreaktio on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9, Akryylipolymeerin polymeroitumisreaktio [muokattu lähteestä 30]

Akryylipinnoitteet, jotka ovat yleisesti käytössä, ovat jo esipolymerisoituja ja liuoksen levittämisen jälkeen sen kovettuminen ja adheesio pintaan tapahtuvat liuoksen liuottimen haihtumisen sekä polymeerin kuivumisen seurauksena. Paras suorituskyky saavutetaan kun pinnoituksesta saadaan kaikki liuotin haihdutettua.³¹

2.3 Testaus ja tarkastukset

Mikään todellinen prosessi ei takaa täydellistä saantoa, joten on kannattavaa testata tuotteet viallisten yksiköiden hylkäämiseksi. Virheellisiä tuotteita syntyy prosesseissa pääasiassa kolmen eri vikatyypin seurauksena. Prosessissa voi syntyä ensinnäkin avoimia piirirakenteita tai vastakohtana oikosulkuja. Toiseksi huonon prosessinvalvonnan seurauksena komponentit voivat jäädä sähköisten spesifikaatioiden ulkopuolelle, vaikkei niissä olisikaan selkeitä katastrofaalisia vikoja. Kolmanneksi komponenteille tai systeemeille voi koitua fyysistä vahinkoa useissa prosessivaiheissa tai niiden välillä.³² Varsinkin kuljetus sekä osien pakkaaminen ja purkaminen ovat vaaran paikkoja. Kiekkotasolta edettäessä lopputuotteeseen asti välillä olevat prosessivaiheet voivat kukin vahingoittaa tuotetta, minkä vuoksi on tärkeää testata tuotteen toimivuutta jokaisen prosessivaiheen jälkeen.

Kuten kappaleessa 2.1. esiteltiin, elektronisen laitteen kokoonpanossa on monia eri prosessivaiheita sekä tasoja. Pelkästään nollatason pakkaamisessa voi olla jopa kymmeniä vaiheita, joilla millään ei ole sadan prosentin saantoa.

2.3.1 Sähköinen testaus

Sähköisessä testauksessa lähetetään hallittu elektroninen signaali elektroniikkapiiriin ja systeemin vastetta verrataan vastearvojen hyväksymisrajoihin.³¹ Sähköisellä testauksella

varmistetaan, että mikrosiru toimii sähköisesti, ennenkuin se liitetään osaksi lopullista laitetta.

Sähköinen testaus voidaan suorittaa sekä aktiivisille että passiivisille tyyppisille komponenteille niiden toimivuuden varmistamiseksi. Tämän jälkeen komponentit yhdistetään alustalle. Alustoille suoritetaan usein yhteenkytkentätestaus, joilla varmistetaan yksinään alustan toiminta.³¹ Kun anturi tai mikrosiru on liitetty alustalle, kokonaisuus testataan niin kutsutulla funktionaalisella testauksella, jolla selvitetään laitteen toimivuus. Systeemitason testaamisesta puhutaan, kun testataan kokonaisuutta, josta löytyy komponentit, alusta tai alustat liitettynä piirilevyyn sekä muun muassa virtalähde.

Fyysisiä vikatyyppejä on kolmenlaisia, pysyviä, tilapäisiä ja ajoittaisia.³¹ Pysyvä vika on esimerkiksi avoin piiri ja se on nimensämukaisesti pysyvä. Tilapäinen vika aiheutuu usein ympäristön muutoksesta ja ilmenee vain kertaluontoisesti. Ajoittainen vika esiintyy nimensä mukaisesti ajoittain, ja useammin kuin kerran.

Resistiivisen lämpötila-anturin toiminnan testaus

Resistiivisen lämpötila-anturin toimintaa testataan usein mittaamalla anturikomponentin resistanssia eri lämpötiloissa. Kun ympäristön lämpötila tunnetaan, eri lämpötiloissa mitattujen resistanssien, esimerkiksi R_1 ja R_2 , arvolla voidaan rakentaa sopivia lineaarisia sovituksia resistanssin ja lämpötilan riippuvuudelle. Näiden sovitusten on oltava tietyissä anturin testaajan tai valmistajan määrittelemissä rajoissa. Mikäli sovitukset ei ole määritellyissä rajoissa, anturi hylätään toimimattomana.

2.3.2 Visuaalinen tarkastaminen

Visuaalisessa tarkastamisessa tarkastaja silmällä katsoen tarkistaa, että tuote täyttää sille määritellyt vaatimukset. Amerikkalainen Federal Aviation Administration, FAA, on määritellyt visuaalisen tarkastamisen prosessiksi, jossa ”avustamaton silmä, yksin tai apuvälineiden avulla, tekee johtopäätöksiä tarkastettavan yksikön kunnosta”.³³ Visuaalinen tarkastaminen on pääasiallinen käytettävä tarkastustapa lentokoneen rakenteiden ja voimalaitosten tarkastustoimissa.³³ Usein visuaalisessa tarkastamisessa voidaan käyttää apuna mikroskooppia, mikäli tutkittavassa tuotteessa on pieniä yksityiskohtia, tai esimerkiksi ultraviolettivaloa, jos tuotteessa fluoresoivia kohteita.³³ Esimerkiksi pinnoitusaineet ovat usein fluoresoivia pinnan laadunvalvonnan helpotukseksi. Visuaalista tarkastamista käytetäänkin elektroniikassa useimmiten

tuotteen pinnan tai pinnoituksen laadun tarkastamiseen.³⁴ Visuaalisesti tarkastaen voidaan havaita epätäydellisyydet pinnan laadussa, varsinkin jos käytetään mikroskooppia.

Visuaalinen tarkastaminen on kuitenkin operaattorien suorittamana subjektiivinen tarkastamistapa, joten se on riippuvainen operaattorista. Visuaalinen tarkastaminen on joissain tapauksissa korvattu automaattisella optisella tarkastuksella (engl. *automatic optical inspection*, AOI). Automaattiseen tarkastukseen siirryttäessä päätöksessä ollaan vedottu automatisoidun prosessin parempaan luotettavuuteen.

2.4 Kustannusanalyysi

Elektronisten laitteiden valmistuksen kustannukset koostuvat työvoiman kustannuksista, materiaalikustannuksista, työstökustannuksista ja kalustokustannuksista.³⁵

2.4.1 Työvoimakustannukset

Työvoimakustannukset prosessia kohden rakentuvat kaavan 6 mukaisesti. Työvoimakustannukset kertovat kuinka paljon tarvittava työvoima kustantaa tiettyä prosessivaihetta kohden.³⁵

$$C_L = \frac{N_{hlö} T P_{työvoima}}{N_{panos}} \quad (6)$$

Kaavassa $N_{hlö}$ on prosessissa tarvittavien operaattorien lukumäärä, T on prosessin viemä aika, $P_{työvoima}$ on työvoiman hinta ja N_{panos} on prosessin kapasiteetti, eli kuinka monta yksikköä panosta prosessissa voidaan käsitellä. $N_{hlö}$ voi olla pienempi kuin yksi, mikäli prosessi ei vaadi operaattorin kokonaista työpanosta. Jos operaattori siis hoitaa tasapuolisesti esimerkiksi kahta prosessia, $N_{hlö}$:n arvo on 0,5.

2.4.2 Materiaalikustannukset

Materiaalikustannukset prosessivaihetta kohden lasketaan kaavan 7 mukaisesti.³⁵

$$C_M = \sum U_{materiaali} C_{materiaali} \quad (7)$$

Kaava on summa prosessin vaatimasta materiaalmäärästä $U_{materiaali}$ ja materiaalin hinnasta $C_{materiaali}$. Materiaalmäärä voidaan ilmoittaa pituuden, painon, lukumäärän, tilavuuden tai pinta-alan mukaan, mutta hinnankin on oltava silloin tiedossa samaa yksikköä kohden.

2.4.3 Työstökustannukset

Työstökustannukset ovat kustannuksia, joita ilmaantuu vain kerran tai muutaman kerran suoritettavista toiminnoista. Kustannukset voidaan esittää kaavan 8 muodossa.³⁵

$$C_T = \frac{C_t N_t}{Q} \quad (8)$$

Kaavassa C_t on työstöaktiviteetin kustannus, N_t on työstön kohteena olevien tuotteiden lukumäärä ja Q on tuotettujen tuotteiden kokonaismäärä. Kaavalla laskettu C_T kertoo siis työstön kustannuksista suhteutettuna kokonaistuotannon määrään.

2.4.4 Kalustokustannukset

Kalustokustannukset koostuvat tuotantolaitteiden sekä -tilojen hankinta- sekä ylläpitokustannuksista.³⁵

$$C_C = \frac{C_e}{D_L N_{panos} T_{op}} \quad (9)$$

Kaavassa 9 C_e on tuotantolaitteen tai -tilan ostohinta, D_L on poistoikä vuosissa eli vuosimäärä jolle sijoituksen kustannukset on jakotettu talousdokumenteissa, T ja N_{panos} ovat kuten yhtälössä 6 ja T_{op} on laitteen operatiivinen aika, eli kuinka monta tuntia laitetta käytetään vuodessa.

2.4.5 Kokonaiskustannukset

Kokonaiskustannukset, C_{manuf} , koostuvat edellä käsitellyistä työvoima-, materiaali-, työstö- ja kalustokustannuksista. Lisäksi kokonaiskustannuksiin kuuluu yleiskustannukset C_{OH} , jotka on kohdistettu johonkin kustannuspaikkaan sekä jätteenkäsittelykustannukset C_W . Vaihtoehtoisesti yleiskustannukset voidaan sisällyttää työvoimakustannuksiin ja jätteenkäsittelykustannukset voidaan sisällyttää johonkin prosessiin, jolloin ne voidaan kohdistaa työvoima-, materiaali-, työstö- tai kalustokustannuksiin.³⁵ Kokonaiskustannusten laskentakaava on esitetty kaavassa 10.

$$C_{manuf} = C_L + C_M + C_T + C_C (+C_{OH} + C_W) \quad (10)$$

Kokonaiskustannuksiin voidaan vaikuttaa oppimiskäyrien kautta, jolloin tuotteiden kustannuksia saadaan matalammiksi.

2.4.6 Kapasiteetti

Työvoima- ja kalustokustannuksiin vaikuttaa prosessiaskeleiden kapasiteetti.³⁵ Kapasiteetilla tarkoitetaan sitä, kuinka monta tuotetta yhdellä prosessointikerralla

voidaan käsitellä. Jos esimerkiksi yhden tuotteen yhden prosessivaiheen työstämiseen tarvitaan yhden operaattorin jakamaton huomio tunnin ajan, on se paljon kalliimpi prosessivaihe verrattuna siihen, että sama prosessiaskel voitaisiin tehdä samaan aikaan kymmenellä tai vaikka sadalle tuotteelle. Elektroniikan valmistusprosesseissa tuotteet ovat usein siruja kiekolla tai yksiköitä arkeilla. Kapasiteetti lasketaan kaavan 11 mukaisesti.³⁵

$$N_p = N_e N_u \quad (11)$$

Kaavassa 11 N_e on prosessissa prosessoitavien kiekkojen tai arkkien lukumäärä ja N_u on kiekossa tai arkissa olevien yksiköiden lukumäärä. Kiekossa olevien sirujen lukumäärän laskemiseen on kehitetty erilaisia algoritmeja, joista eräs on esitetty kaavassa 12.

$$N_u = \frac{L\pi(0.5D_w - E)^2}{(S+K)^2} * e^{-\frac{S+K}{0.5D_w - E}} \quad (12)$$

Kaavassa 12 oletetaan, että kiekko on täysin pyöreä, sirut ovat neliönmuotoisia sivun pituutetaan S , D_w on kiekon halkaisija, E on kiekon käyttämättömissä oleva reuna-alue ja K on minimiväli sirujen välillä.³⁵ Yhtälö toimii parhaiten, kun kiekon koko suhteessa sirujen kokoon on suuri.

2.5 Tilastollinen prosessinohjaus

Prosessi on toiminto, jonka seurauksena sisäänmenevät tuotantopanokset muuttuvat ulostulevaksi tuotteeksi. Konkreettisen työstämisen, kuten elektronisen laitteen kokoonpanon, lisäksi prosessi voi olla myös aineetonta, kuten laadunvarmistusmittaus. Prosessin tuote siirtyy edelleen asiakkaalle. Asiakas voi olla ulkopuolinen maksava asiakas, mutta se voi olla myös yrityksen sisäinen asiakas, eli esimerkiksi tuotantoketjun seuraava linkki.

Prosessinohjauksella prosessiin liittyviä muuttujia ja niiden vaikutuksia pyritään analysoimaan ja hallitsemaan, jotta saavutettaisiin halutunlainen lopputuote. Halutunlaisella tarkoitetaan sitä, että tuotteiden ominaisuudet ovat ennaltamääriteltujen ohjearvojen sisällä.³⁶ Prosessinohjauksen lähtökohtana määritellään prosessi. Jos kyseessä on anturin liittäminen piirilevyille, prosessi on verrattain selkeästi määriteltä. Toisaalta esimerkiksi asiakasreklamaatioprosessi voi olla vaikeampi määritellä. Prosessin tuotantopanokset ja tuotteet on myös määriteltävä. Näiden jälkeen on luonnollista määritellä myös tuottaja sekä asiakas, ja sen jälkeen asiakkaan vaatimukset tuotteelle.³⁶

Kun nämä osatekijät on määritelty, on prosessia mahdollista alkaa tarvittaessa parantamaan. Parannusprojekteissa tähdätään aina siihen, että hukkaa ei tule lainkaan, eli että jokainen tuotettu tuote vastaa asiakkaan vaatimuksia. Mikäli niinkutsuttu ”nollahukka” ei ole tavoitteena, sitä ei voida koskaan saavuttaakaan.³⁶ Prosessinohjauksella pyritään ensisijaisesti etukäteen estämään hukan syntyminen, eikä kuluttamaan aikaa jälkitarkastamisiin ja viallisten tuotteiden hylkäämiseen. Mikäli vialliset tuotteet huomataan vasta loppuvaiheessa, on se miltei kallein mahdollinen vaihe tehdä tällainen havainto. Kalliimmaksi tulee ainoastaan, mikäli tuotteet ehtivät asiakkaalle asti. Mitä aikaisemmin viallinen tuote huomataan, sitä vähemmän se ehtii käyttää resursseja ja sitä vähemmän näitä resursseja menee hukkaan.

Tilastollinen prosessinohjaus on sitä, että prosessista mitataan ja tilastoidaan jotakin osuutta tai ominaisuutta.³⁷ Tällainen osuus voi olla esimerkiksi viallisten tuotteiden osuus valmistettujen tuotteiden kokonaismäärästä. Se voi olla myös jonkin testauksen tulosten tilastoimista³⁷, kuten elektronisen laitteen vastuksen mittaamista. Tällaisella mittaamisella ja siihen reagoimisella pyritään vähentämään vaihtelua, josta useimmat laatuongelmat kumpuavat.³⁶ Vaihtelun vähentäminen on mahdollista, mikäli vaihtelua pystytään kvantitatiivisesti mittaamaan sekä valvomaan. Mittaamisen lisäksi tarvitaan tieto prosessin stabiiliudesta. Mikäli prosessi ei ole stabiili, ei vaihtelun vähentymisten syystä voida olla varmoja.³⁷ Tässä osiossa esitellään tärkeimmät matemaattiset tunnusluvut sekä termit, joita tilastollisessa prosessinohjauksessa hyödynnetään. Lisäksi luodaan katsaus vaihtelun merkitykseen prosesseissa.

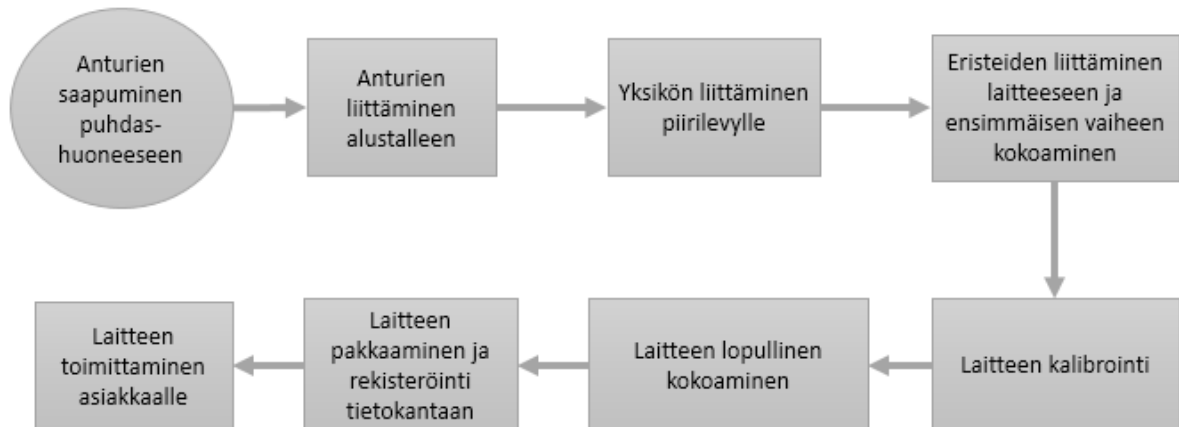
2.5.1 Prosessien materiaali- ja työhukka

Esimerkkinä kustannusten kasvamisesta tuotetta jalostettaessa pidemmälle esitetään elektroninen mittalaite, jonka mittaelementti on kapasitiivinen anturi. Anturi valmistetaan tehtaalla A, jossa se valmistetaan litografisten prosessien avulla. Anturit valmistetaan ohutkalvoja kasvattamalla substraatille ja etsaamalla niihin haluttuja muotoja. Tässä prosessivaiheessa tuottaja on ohutkalvoanturivalmistuksen operaattori tai tiimi ja asiakas on valmiin anturin vastaanottava prosessoija.

Tehtaalta A anturi siirtyy tehtaalle B, jossa prosessoija liittää anturin piirilevylle. Käytetään selkeyden vuoksi tämän vaiheen piirilevystä termiä alusta.

Anturin liittämisessä alustalle käytetään kappaleessa 2.1.3 esiteltyä flip chip – teknologiaa. Seuraavassa vaiheessa juuri koottu anturi-alusta -yhdistelmä liitetään toiselle

piirilevyllä, joka sisältää muun muassa laitteen virtalähteen, saman vaiheen yhteydessä tuote saa eristeet ja osan suojakuoristaan. Tämän jälkeen laite kalibroidaan. Sitten laite saa tehtaalla B vielä viimeiset ympäristöltä suojaavat kuoret lopullisessa kasaamisessa, jonka jälkeen tuote pakataan ja rekisteröidään ja sitten toimitetaan asiakkaalle. Laitteen yksinkertaistettu tuotantoketju tehtaalla B on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10. Mittalaitteen loppukokoonpanon tuotantoketju tuotantomateriaalien suhteen

Tässä esimerkissä on selvää, että mikäli alkuperäinen anturi on viallinen, on se kustannusten perusteella kannattavinta hylätä jo tehtaalla A. Mikäli viallinen anturi ehtii päästä jo tuotantoketjun loppuun, mikä on toinen ääripää, on siihen liitetty turhaan kaksi piirilevyä sekä kuoret ja eristeet ja tuote on kalibroitu turhaan. Näiden konkreettisten materiaalikustannusten lisäksi hukkaan menee pahimmillaan useiden tuntien tai jopa päivien työ, jonka operaattorit ovat suorittaneet kokoonpano- tai kalibroituvaiheissa. Prosesseja on siis hyvä pystyä hallitsemaan, jotta turhat kustannukset saadaan minimoitua viallisten tuotteiden tapauksissa. Esimerkiksi tällaisia kustannuksia haaskaavia prosesseja voidaan estää tilastollisen prosessinohjauksen avulla. Mikäli kyseistä menetelmää käytetään tehtaalla A anturin mahdollisen testauksen yhteydessä, voidaan toimimattomat anturit hylätä ja mikäli niiden määrä kasvaa, prosessin sujumiseen puuttua, jotta turhia kustannuksia ei syntyisi.

2.5.2 Matemaattinen termistö

Seuraavassa osiossa määritellään tilastollisen prosessinhallinnan kannalta olennaisimmat matemaattiset tunnusluvut.

Kaavassa 13 on esitetty aritmeettisen keskiarvon matemaattinen määritelmä.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (13)$$

Kaavassa 13 n on otoksen koko ja x on kunkin näytteen mitatun attribuutin arvo, eli havaintoarvo.

Otoksen varianssi lasketaan kaavan 14 mukaisesti.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n} \quad (14)$$

Varianssista käytetään varsinkin pienten otosten tapauksessa korjattua varianssia, σ_k^2 jossa jakajana käytetään näytteiden lukumäärää vähennettynä yhdellä. Korjatun varianssin kaava on esitetty kaavassa 15.

$$\sigma_k^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (15)$$

Varianssi kuvaa sitä, kuinka otoksen havaintoarvot ovat hajaantuneet keskiarvon ympärille. Pienen varianssin tapauksessa hajaantuminen on pientä, eli arvot ovat keskittyneet lähelle keskiarvoa, kun taas suuren varianssin tapauksessa arvot ovat hajaantuneet keskiarvosta.

Standardipoikkeama on varianssin neliöjuuri kaavan 16 mukaisesti.

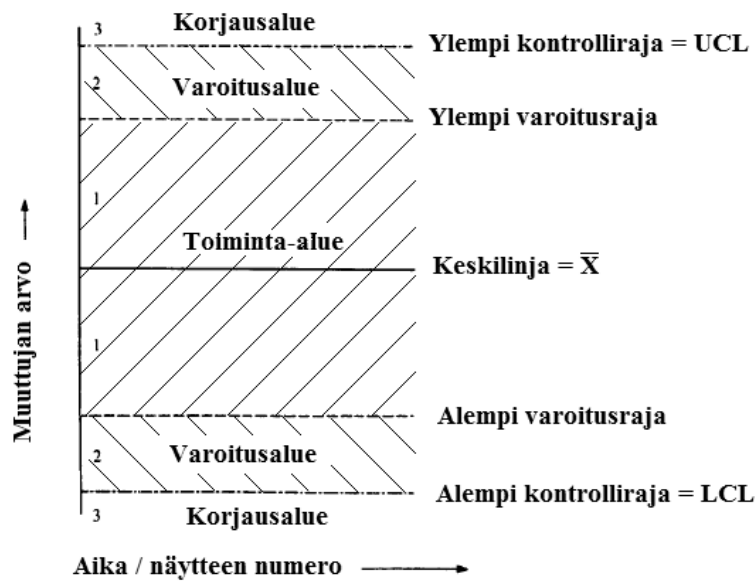
$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (16)$$

Standardipoikkeamasta käytetään termiä keskihajonta tilastollisen analyysin yhteydessä. Keskihajonta kuvailee varianssin tavoin havaintoarvojen levittäytyneisyyttä keskiarvonsa ympärille. Keskihajontaa käytetään havaintoarvojen jakaumaa kuvaavana parametrina, eli hajontalukuna, sillä sillä on sama dimensio kuin aritmeettisella keskiarvolla.

2.5.3 Seurantakaavio

Seurantakaaviosta löytyy keskilinja \bar{x} sekä ylempi (UCL) ja alempi kontrolliraja (LCL) sekä kaavioon syötetyt havaintopisteet. Prosessien suorituskkyä seurataan seurantakaavioiden avulla, sillä kontrollirajojen ulkopuolella, niin sanotulla korjausalueella, olevat pisteet kertovat prosessin epätavallisesta vaihtelun määrästä. Lisäksi kaavioon on voitu lisätä niinkutsutut varoitusrajat, jotka viestivät prosessin lähestymisestä kontrollirajoja.

Kuvassa 11 on esitetty seuranta-kaavion perusmuoto.



Kuva 11, Seuranta kaavion perusilme [muokattu lähteestä 37]

Kuvassa 11 keskellä on keskilinja \bar{X} , joka on prosessissa mitattavan tuotteen ominaisuudelle määritetty keskiarvo. Sen lisäksi kuvassa on varoitusrajat sekä kontrollirajat. Varoitusrajojen sisältä löytyy alue 1 eli toiminta-alue, kontrollirajojen sisältä löytyy alue 2 eli varoitusalue ja kontrollirajojen ulkopuolelta löytyy alue 3 eli korjausalue. Rajat on sijoitettu graafiin normaalijakaumaan ja sen standardipoikkeamiin perustuen.

Varoitus- ja kontrollirajojen asettaminen seuranta-kaavioon on esitetty kaavassa 17 ja 18.

$$\text{varoitusraja} = \pm 2\sigma \quad (17)$$

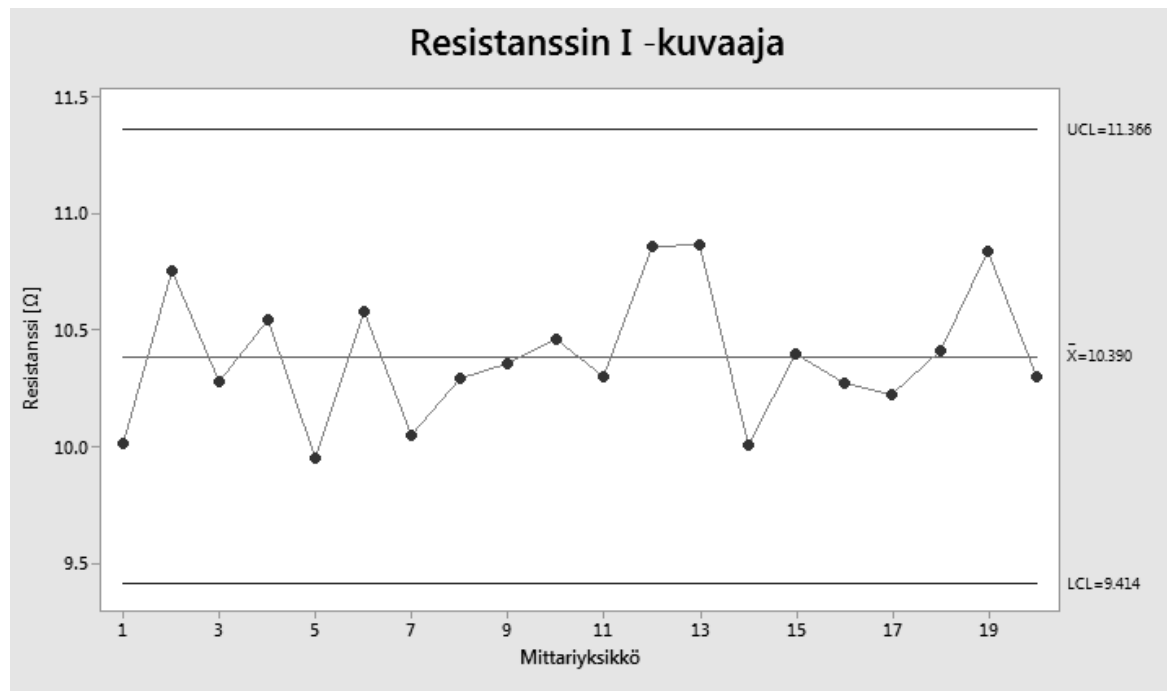
$$\text{kontrolliraja} = \pm 3\sigma \quad (18)$$

Mikäli otos on normaalijakautunut, varoitusrajojen sisällä sijaitsee 95,4 % näytteen arvoista, eli noin joka neljäskymmenes sijoittuu tämän rajan ulkopuolelle, kun läsnä on vain satunnaisia muuttujia. Kontrollirajojen sisällä taas sijaitsee 99,7 % näytteiden arvoista, joten vain muutama mittaustulos tuhannesta sijoittuu tämän alueen ulkopuolelle. Toisaalta se, että kaksi havaintopistettä sijoittuu perätysten varoitusalueelle, on todennäköisyydeltään noin 1:1600, mikä on todennäköisyyden suuruusluokaltaan samalla tasolla kuin yksi piste kontrollirajan ulkopuolella.

2.5.4 Frekvenssi, histogrammi ja paretokaavio

Prosesseja valvotaan ja mitataan tilastollisesti erilaisten ohjelmien avulla. Minitab-ohjelma on tilastollinen ohjelma, jonka avulla voidaan piirtää erilaisia kuvaajia tilastollisesta datasta sekä suorittaa erilaisia analyyseja. Syöttämällä ohjelmiston sarakkeisiin mitattuja arvoja, voidaan yleiskuvan saamiseksi luoda aluksi niinkutsuttu I-kuvaaja (engl. *I chart*), jonka nimessäoleva I-kirjain viittaa individual-sanaan eli yksittäiseen arvoon. Kuvaajaan Minitab asettaa automaattisesti keskiarvolinjan \bar{X} , sekä ylemmän (UCL) ja alemman kontrollirajan (LCL) ja kuvaajaan asettuvat yksittäiset mittapisteet. I-kuvaaja perustuu seuranta-kaavioon.

Esimerkki aidosta mittadatasta I-kuvaajaan sijoitettuna löytyy kuvasta 12. Mittauksen kohteena oli erään anturisirun johtimen resistanssi.



Kuva 12, Johtimien resistanssin mittaustulokset sijoitettuna Minitabin I-kuvaajaan

Kuvan 12 kuvaajasta voidaan nähdä miten mittapisteet asettuvat keskilinjaan nähden eli kuinka paljon prosessissa on vaihtelua.

Frekvenssi kuvaa jonkin tietyn havaintoarvon tai havaintoarvovälin esiintymää otoksessa. Histogrammeja käytetään helpottamaan tulosten hahmottamista visuaalisesti. Histogrammia varten tehdään luokkajako havaintoarvojen pohjalta. Luokkajako tulee tehdä niin, että kaikki otoksen havaintoarvot sijoittuvat johonkin luokkaan, ja luokkien välit jaetaan sopivankokoisiksi. Histogrammi laaditaan sijoittamalla kukin havaintoarvo

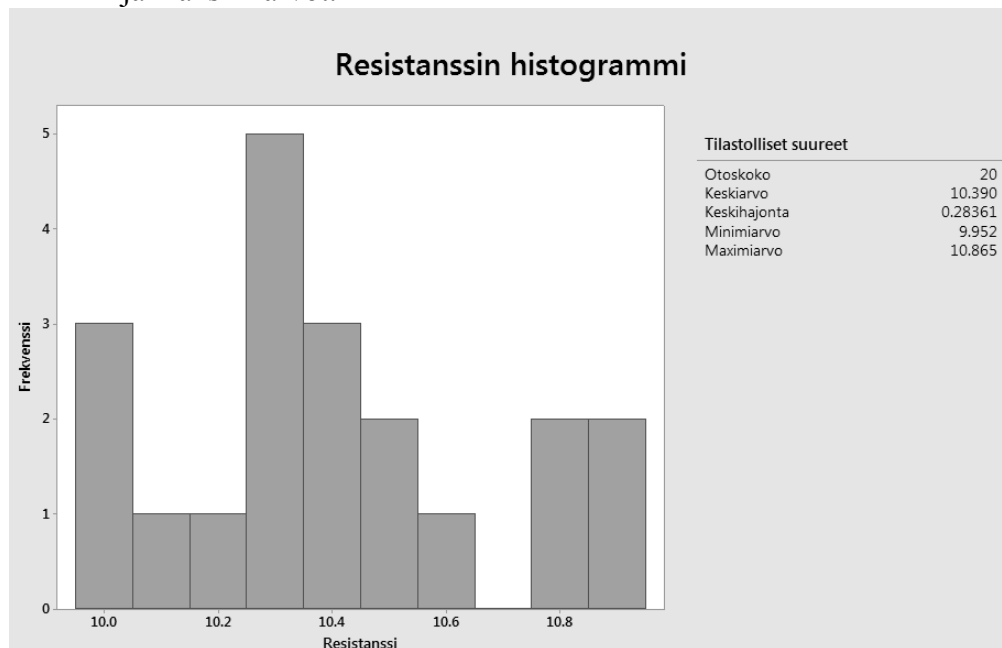
omaan luokkaansa, jolloin puhutaan luokitellusta frekvenssijakaumasta. Tämän jälkeen laaditaan histogrammi, joka koostuu suorakaiteen mallisista palkeista, joiden kanta määrittyy luokan koon mukaan ja palkin korkeus kuvaa havaintoarvojen frekvenssiä. Lopulta syntyneen suorakaiteen pinta-ala kuvaa kyseisen otoksen luokkafrekvenssiä. Kuvassa 12 on esitetty esimerkki histogrammista, joka on tehty pistekaaviossa esitetyistä mittaustuloksista.

Histogrammia varten johtimien resistanssit oli luokiteltu taulukon 1 mukaisiin suuruusluokkiin, jotka löytyvät sarakkeesta ”Resistanssi”. Luokat nimettiin niiden keskimmäisen arvon mukaan. Taulukkoon oli myös merkitty kuinka monta havaintopistettä kuhunkin luokkaan kuului, eli kunkin luokan frekvenssi.

Taulukko 1, Histogrammia varten tehdyt luokkajaot

Luokka	Resistanssi	Frekvenssi
10.0	$9.95 \leq R < 10.05$	3
10.1	$10.05 \leq R < 10.15$	1
10.2	$10.15 \leq R < 10.25$	1
10.3	$10.25 \leq R < 10.35$	5
10.4	$10.35 \leq R < 10.45$	3
10.5	$10.45 \leq R < 10.55$	2
10.6	$10.55 \leq R < 10.65$	1
10.7	$10.65 \leq R < 10.75$	0
10.8	$10.75 \leq R < 10.85$	2
10.9	$10.85 \leq R < 10.95$	2

Taulukkoon 1 perustuen voitiin luoda histogrammi, joka on esitetty kuvassa 13. Histogrammiin on myös tulostunut näytteen otoskoko, keskiarvo, keskihajontasekä minimi- ja maksimiarvot.



Kuva 13, Johtimen resistanssimittauksen havaintoihin perustuva Minitab-histogrammi

Paretokaavio asettaa histogrammin luokat suuruusjärjestykseen, siten että suurimman frekvenssin luokka on ensimmäisenä. Paretokaaviota käytetään havainnollistamaan millainen otoksen rakenne on, eli kuinka suurta osaa näytteistä kukin luokka edustaa. Paretokaaviossa oikealla akselilla on prosentuaalinen osuus, joka summautuu 100 prosenttiin.

2.5.5 Vaihtelu prosesseissa

Vaihtelua voi ilmetä kaikkialla: esimerkiksi työtavoissa, tuotteiden ominaisuuksissa ja toimitusajoissa. Laatuongelma on esimerkiksi huonosti kovettunut adhesiiviliitos piirilevyn ja anturin välillä tai valuvika elektronisen laitteen muovikuoressa.

Prosessin laadullista tasoa voidaan parantaa vähentämällä vaihtelua, jolloin myös tuottavuus nousee.³⁶ Laadukkaan lopputuloksen tuottamiseen vaaditaan tuottajien, eli prosessien suorittajien, sitoutuminen laatuun. Jotta laadukkaan tuotteen tuottaminen onnistuu, täytyy prosessin suorituskykyä pystyä tarkastelemaan. Tärkeä lähtökohta on tutkia, onko prosessi kyvykäs tuottamaan tarvittavan korkeaa laatua.³⁸ Lisäksi on

pystyttävä selvittämään saavutetaanko tarvittavan korkeaa laatua millä tahansa tutkittavalla tuotannon hetkellä. Lopuksi tulisi olla mahdollisuus muuttaa tai säätää prosessia, jotta tuotteen laatukriteerit täyttyvät, mikäli ne eivät jo täyty. Kunkin tuotteen yksilölliset laatuvaatimukset määrittävät riittävän laatutason.³⁸ Tilastollinen lähestymistapa prosessinohjaukseen tarjoaa työkaluja laadun tason konkreettiseen mittaamiseen.

Tärkeä askel prosessin kontrolloinnissa on arvioida, voidaanko haluttu lopputulos tai tuote käytännössä saavuttaa, eli onko siihen kapasiteettia. Sen jälkeen on tarpeen analysoida toteutetaanko oikeat toimenpiteet, eli suoritetaanko työ halutulla tavalla.

Jotta laadun saavuttamista voidaan tutkia, on sen käsitettä hyvä täsmentää prosessinohjauksen näkökulmasta. Laatu jakautuu kahteen osa-alueeseen, suunnittelun laatuun ja suunnittelun toteuttamisen laatuun.³⁶ Suunnittelun laadulla tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin tuote on suunniteltu täyttämään sille ja sen toiminnalle asetetut vaatimukset. Tämän toteutumiseen vaaditaan tarkat ohjearvot. Ohjearvot kokoavat asiakkaan vaatimukset tuotteen ominaisuuksista.³⁶ Ohjearvot voivat myös olla erilaisten standardien määrittämiä. Suunnittelun laatu määrittää myös tuotteen markkina-aseman laadun suhteen markkinoilla. Suunnittelun toteuttamisen laatu määrittää, kuinka hyvin suunniteltu laatu saavutettiin käytännössä. Sen määrittää pitkälti toimintojen laadullinen suorituskyky, kuten prosessien kyvykkyys.

2.5.6 Vaihtelun havaitseminen ja siihen reagointi

Vaihteluun pyritään reagoimaan riittävän ajoissa. Vaihtelun tarkkailemiseen käytetään apuna seurantakaaviota. Vaihtelun taso kertoo myös laadun tasaisuudesta, joten seurantakaaviota käytetään tuotteen laadun tarkkailemiseen. Seurantakaaviossa tutkitaan jotakin suuretta, jonka havaitut arvot merkitään kaavioon. Esimerkki tällaisesta käytöstä on kuvan 12 mukainen johtimen resistanssin arvojen seuranta. Kuvan 12 Minitab:n I-kuvaajassa resistanssin mitatut arvot vaihtelevat noin 10-11 Ω :n välillä. Kontrollirajat on asetettu kolmen standardihajonnan päähän keskiarvosta, kuten kaavassa 18 on esitetty. Tässä tapauksessa arvojen 11,366 Ω ja 9,414 Ω kohdille. Standardihajonnat on laskettu kyseisen otoksen arvojen perusteella kaavan 16 perusteella.

Seurantakaaviossa mitatulle suurelle hyväksytään vaihtelualue, kuvassa 11 alue 1, minkä välillä muuttujan arvot vaihtelevat, kun prosessin sanotaan olevan kontrollissa. Mikäli prosessi ei ole kontrollissa, vaan myös erityislaatuksia, ei-satunnaisia syitä

vaihtelulle löytyy, menevät muuttujan arvot varoitusalueelle 2 tai jopa korjausalueelle 3. I-kuvaajassa ei ole erikseen eriteltynä varoitusaluetta, vaan sijoitetut UCL- ja LCL-rajat määrittävät toiminta-alueen ja sen ulkopuolella on korjausalue.

Seurantakaaviota käytetään kuvaamaan prosessin säätötarvetta. Mikäli yksittäisiä arvoja löytyy varoitusalueelta 2, prosessia tulisi seurata, sillä on mahdollista, että prosessi ei ole enää hallinnassa.³⁷ Jos taas muuttujan arvo sijoittuu korjausalueelle, on prosessissa varmasti ollut läsnä muuttujia, joiden johdosta prosessiin vaikuttaa muitakin kuin satunnaismuuttujia.³⁸ Tällöin nimensämukaisesti tulisi ryhtyä korjaustoimenpiteisiin syiden etsinnässä ja prosessin stabiloimiseksi.

Mikäli arvot eivät sijoitu tasaisesti molemminpuolin lähelle keskiarvolinjaa, se voi viestiä prosessin keskiarvon siirtymisestä. Tällöin prosessissa on läsnä muitakin kuin satunnaismuuttujia. Esimerkki tällaisesta tilanteesta on peräkkäiset arvot varoitusalueella. Toisaalta trendeihin ja erilaisiin arvojen sarjoihin ja kaavamaisuuksiin tulisi reagoida jopa ennenkuin ne ehtivät mennä rajojen yli. Trendiksi määritellään seitsemän pisteen kasvava tai laskeva suora ja sarjaksi pisteiden katkeamaton sarja, joka on keskiarvon ylä- tai alapuolella.³⁷

2.5.7 Six sigma –laatutaso

Six sigma on teollisuustuotannossa vakiintunut kaupallinen laatustandardi, joka on The Lean Six Sigma Companyn omistama tuote. Six sigma -termillä viitataan siihen, että normaalijakautuneen otoksen tapauksessa kaikki näytteet sijaitsevat korkeintaan kuuden standardipoikkeaman päässä keskiarvosta. Tämä tarkoittaa, että otoksen vaihtelu on saatu kavennettua hyvin pieneksi. Prosessinhallinnan sekä kustannusäästöjen näkökulmasta tällaiseen tilanteeseen olisi mielekästä tähdätä, ja siihen pyritään kaventamalla otoksen sisäistä hajontaa.

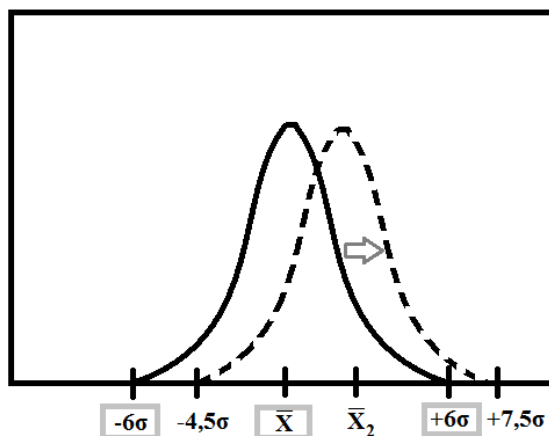
Taulukossa 2 on esitetty erilaisten sigma-laatutasojen ja viallisten, eli hyväksymisrajojen ulkopuolella olevien, yksiköiden määrä miljoonan yksikön otoksessa.³⁹

Taulukko 2, Eri levyisten vaihteluvälien tuottamien viallisten tuotteiden määrät ja osuudet [muokattu lähteestä 39]

Vaihteluväli	Hyväksymisrajojen ulkopuolella olevat yksiköt puolittain [%]	Hyväksymisrajojen ulkopuolella olevat yksiköt [ppm]	Hyväksymisrajojen ulkopuolella olevat yksiköt [ppm]
$x \pm \sigma$	15.8655	158655	317310
$x \pm 1.5\sigma$	6.6806	66806	133612
$x \pm 2\sigma$	2.275	22750	45500
$x \pm 3\sigma$	0.135	1350	2700
$x \pm 4\sigma$	0.00315	31.5	63
$x \pm 4.5\sigma$	0.00034	3.4	6.8
$x \pm 5\sigma$	0.0000285	0.285	0.57
$x \pm 6\sigma$	0.0000001	0.001	0.002

Taulukosta voidaan nähdä, että kuuden sigman laatutasolla viallisia yksiköitä olisi miljoonan otoksesta vain kaksi tuhannesosaa.

Eräs käytännön hyöty, jonka six sigma –laatutason saavuttaminen tuo, on se, että keskiarvo voi heilua tietyissä rajoissa. Asiaa on havainnollistettu kuvassa 14, jossa on esitetty normaalijakauma, jonka keskiarvo on \bar{X} ja sen kaikki arvot sijaitsevat välillä $\pm 6\sigma$.



Kuva 14, Erään prosessin normaalijakautunut otos ja sen keskiarvon siirtyminen $1,5\sigma$ oikealle [muokattu lähteestä 38]

Nyt jos esimerkiksi keskiarvo heilahtaisi $1,5$ standardipoikkeaman verran oikealle, käyrän oikeanpuolinen raja siirtyisi pisteeseen $+7,5\sigma$, jolloin sen oikealla puolella ei sijaitsisi käytännössä yhtään näytettä, kun taas vasemmalla puolella raja olisi siirtynyt pisteeseen $-4,5\sigma$, jonka ulkopuolella sijaitsee $3,4$ näytettä miljoonasta kuten taulukosta 2 käy ilmi. Tällä tavalla prosessin keskiarvo voi heilua jopa $1,5$ standardipoikkeaman verran kumpaan tahansa suuntaan vaikuttamatta rapauttavasti saantoon.

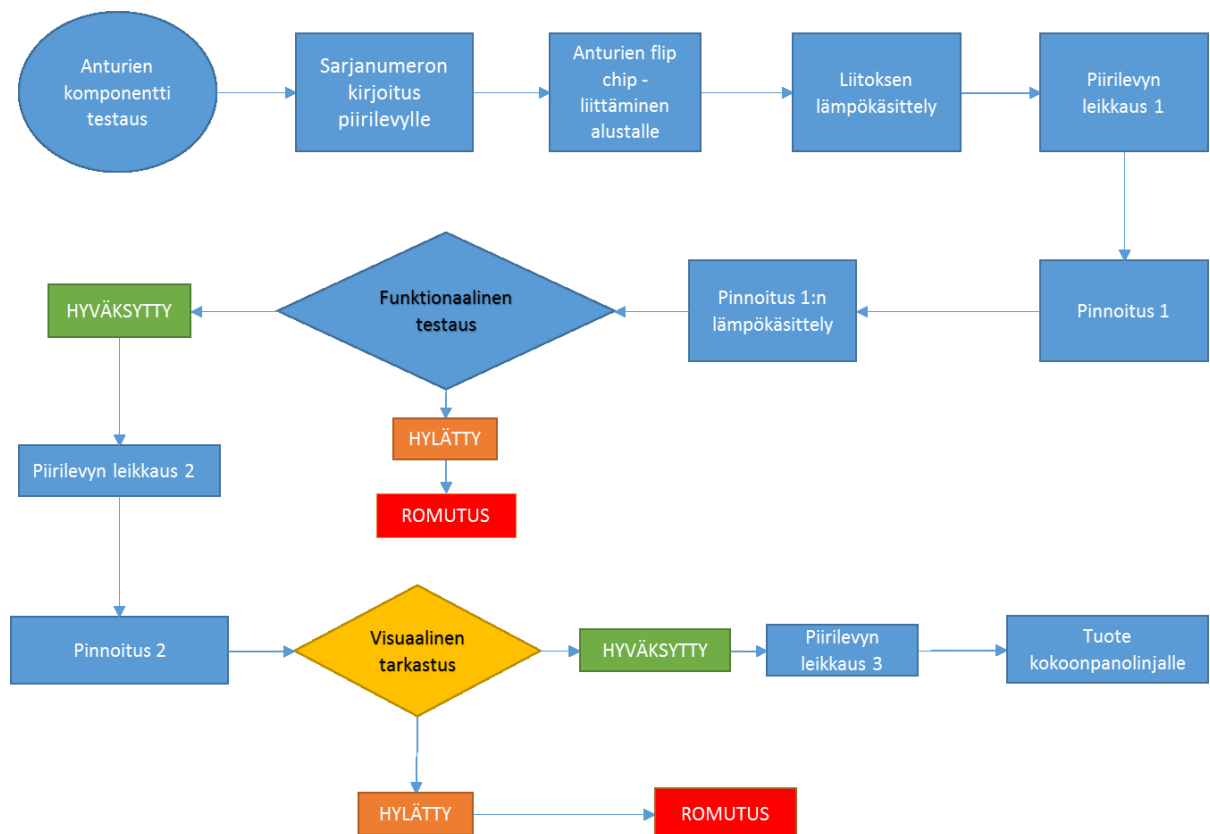
Six sigma -laatutason saavuttamisen avain on vaihtelun eliminointi. Aluksi kuitenkin vaihtelun aiheuttajat tulee tunnistaa. Tuotteen valmistaminen on usein monivaiheinen prosessi, jonka eri vaiheet voidaan nähdä itsenäisinä tapahtumina. Jokaisen vaiheen vaihtelu kumuloituu lopulliseen tuotteeseen. Tutkimusten mukaan suurin osa yrityksistä toimii kolmen ja neljän sigman laatutason välimaastossa.³⁹ Tämä tarkoittaa kustannusten suhteen sitä, että liikevaihdosta 25-40 % menee huonosta laadusta johtuviin kustannuksiin. Mikäli yritys saa laatutasonsa nostettua viiden sigman tasolle, tippuvat kustannukset jopa vain 10 %:iin liikevaihdosta, kun taas kuuden sigman taso tiputtaa kulut yhteen prosenttiin.³⁹ Esimerkiksi lämpötilamittaria valmistettaessa vaihtelun huomattava vähentäminen ja siten kuuden sigman laatutasoon pyrkiminen voi vähentää turhia kustannuksia huomattavasti.

3 Tutkimusmenetelmät ja -aineisto

Aluksi tässä osiossa esitellään tutkimuksen kohteena olevan tuotantoprosessin rakenne. Tämän jälkeen perehdytään tutkimuksen kannalta keskeisiin testauksiin ja tarkastuksiin, joiden avulla tuotantoprosessin tehokkuutta voidaan tilastoida ja analysoida.

3.1 Tutkimuksen kohteena oleva tuotantoprosessi

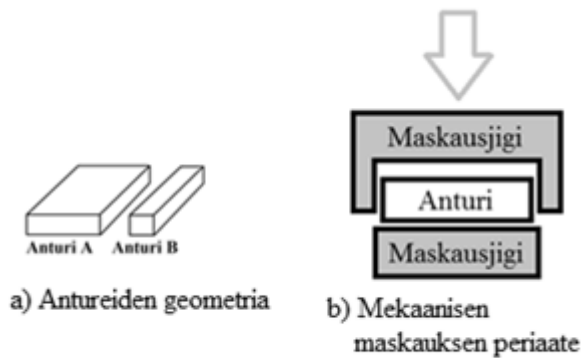
Tutkimuksen kohteena oleva tuotantoprosessi on esitetty kuvassa 15, jossa näkyvät tuotantoprosessin eri vaiheet.



Kuva 15, Tutkimuksen kohteena olevan tuotantoprosessin prosessiketju

Prosessiketjussa on aktiivisia kokoonpanoprosesseja sekä testausprosesseja. Prosessiketju alkaa valmistettujen anturien komponenttitestauksella anturitehtaalla, joka on sirutason sähköinen testaus, eli tyypiltään kappaleessa 2.3.1 mainittu komponenttitestaus. Testaus suoritetaan jokaiselle sirulle yksitellen. Komponenttitesti testaa yksittäisistä siruista viittä ominaisuutta A, B, C, D ja E. Näistä ominaisuuksista yksi on resistiivisen lämpötila-anturin vastusmittaus tietyissä olosuhteissa, muut neljä mittausta ovat tuotteeseen liittyviä muita sähköisiä suureita. Jokainen siru yksilöidään kiekko- sekä paikkanumeroin, jotta sähköisen testauksen tulokset tallentuvat

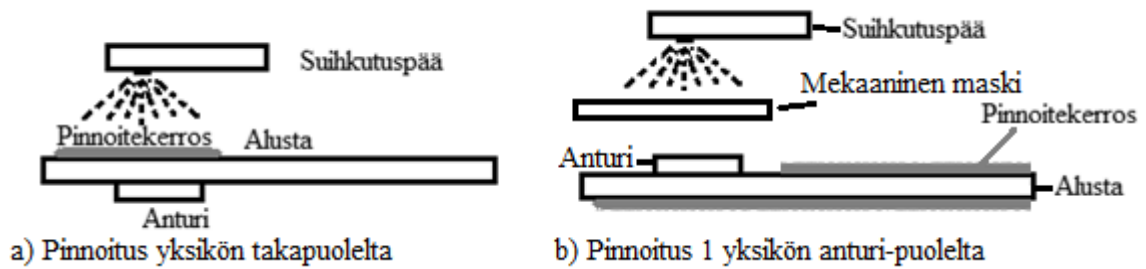
testitulostietokantaan ja ne voidaan hakea sieltä jälkikäteen. Antureiden geometriset muodot on esitetty kuvassa 16 a). Antureiden kokoluokka on satoja mikrometrejä, ja kuten kuvasta 16 a) käy ilmi, anturi A on anturia B leveämpi, vaikka niiden pituudet ja paksuudet ovat samat. Kuvan 16 b)-kohdassa esitetään mekaanisen maskaamisen periaate, joka on myöhemmin osana valmistusprosessia.



Kuva 16, Antureiden A ja B ulkomuoto ja geometria sekä mekaanisen maskauksen periaate poikkileikkauksena

Seuraavassa vaiheessa toimittajalta saapuneille piirilevyalustoille kirjoitetaan yksilöllinen sarjanumero. Tämä sekä seuraavat prosessit funktionaaliseen testaukseen asti suoritetaan kokoonpanon puhdashuoneella. Sen jälkeen anturitehtaalta saapuneet anturit ladotaan flip chip -teknologian avulla alustalle. Alustana toimii piirilevy, joka on suunniteltu muodoltaan sovittamaan anturit mahdollisimman hyvin seuraavalle piirilevyllä myöhemmässä kokoonpanon vaiheessa sekä vastaamaan tuotteelle asetettuja kriteerejä. Kutsutaan jatkossa antureiden ja alustan muodostamaa kokonaisuutta yksiköksi. Flip chip -liittämisen yhteydessä alustalle lisätään pakkausadhesiivia ja sen jälkeen anturi asetetaan haluttuun kohtaan alustaa. Seuraavaksi liitos lämpökäsitellään.

Tämän jälkeen piirilevyä leikataan lähemmäs lopullista muotoa sekä pinnoitus 1 levitetään tietylle alueelle tuotteen pintaa suihkuttamalla. Pinnoitus 1 halutaan suihkuttaa niin, että se ei leviä anturin A päälle. Tästä syystä se suihkutetaan yksikön ”takapuolelle” normaalisti, mikä on esitetty kuvassa 17 a). Anturin puolelle suihkuttaessa anturi peitetään mekaanisella maskilla kuten kuvassa 17 b) on esitetty.



Kuva 17, *Pinnoitusprosessi 1:n periaate yksikön takapuolen sekä anturipuolen prosessoinnissa*

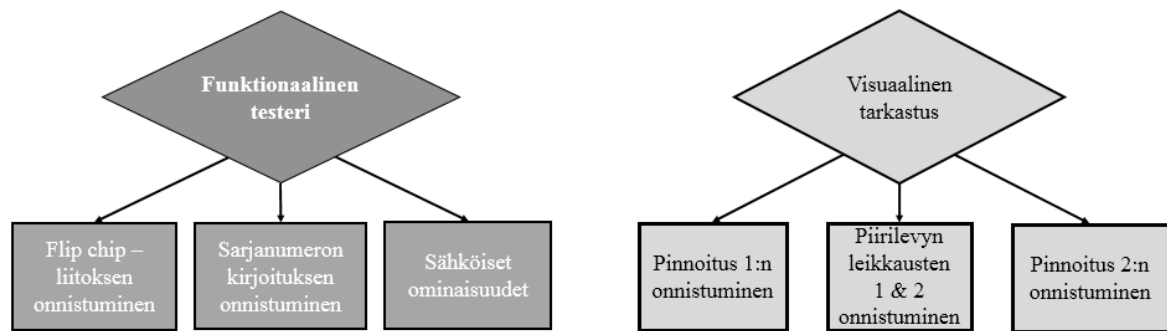
Anturin puolelle suihkutettaessa yksikkö käännetään ympäri ja suihkutuspää pysyy paikallaan. Suihkutus suoritetaan suihkutusalaitteiston sisällä, jossa on imu sekä suihkutuspään yllä että alustan alla, jotta lakan ylimäärä imetään pois prosessista.

Seuraavaksi pinnoitus 1 lämpökäsitellään. Tämän jälkeen seuraa funktionaalinen testaus, jolloin operaattori testaa, että alusta yhdessä antureiden kanssa toimii sähköisesti. Funktionaalinen testaus, eli FT-testaus, mittaa jälleen ominaisuuksia A, B, C, D ja E. Sähköisessä toimivuudessa on kaksi osaa, flip chip -liitoksen onnistuminen sekä anturin sähköiset ominaisuudet. Mikäli anturin valmistuksessa aiemmin anturitehtaalla on tullut kriittisiä virheitä tai esimerkiksi anturin ohutkalvot ovat kärsineet pintavaurion, ne selviävät tässä, sillä mitatut ominaisuudet eivät silloin mahdu hyväksymisrajoihin. Toisaalta mikäli flip chip -liitos on epäonnistunut, myös se näkyy ominaisuuksien arvoissa siten, etteivät ne mahdu hyväksymisrajoihin. FT-testaus paljastaa myös sarjanumeron kirjoittamisen epäonnistumisen, sillä siinä tapauksessa yksiköstä ei pystytä lukemaan sarjanumeroa. Nämä FT-testauksen paljastamat viat on esitetty kuvassa 18. Funktionaalisen testauksen tulokset tallentuvat tietokantaan, josta voidaan löytää saannon taso jopa tuntikohtaisesti ja yksiköiden anturien erä- ja yksikkötiedot, eli mistä kiekkoerästä ja miltä kiekon paikalta kukin anturi on peräisin. Tietokantaan tallentuu myös mittausdata viidestä mitatusta ominaisuudesta.

Funktionaalisen testauksen jälkeen tuotteen piirilevyä leikataan edelleen sekä seuraa pinnoitus 2. Pinnoituksen 2 levittämiseksi käytetään mekaanista maskausta, sillä pinnoituksen ei haluta leviävän anturin aktiivisiin kohtiin. Mekaanisen maskauksen toimintaperiaatetta läpileikkauksena havainnollistetaan kuvassa 15 c). Mekaanisessa maskauksessa anturit peitetään pehmustetulla maskausjigillä, joka painautuu tuotteen

antureiden pintaa vasten estäen pinnoituksen leviämisen antureiden päälle pinnoitusprosessissa. Pinnoitus 2:n jälkeen operaattori suorittaa visuaalisen tarkastuksen.

Kuvassa 18 havainnollistetaan mitkä kussakin prosessivaiheessa syntyneet viat huomataan FT-testauksessa ja mitkä visuaalisessa tarkastuksessa.



Kuva 18, Funktionaalisessa tarkastuksessa ja visuaalisessa tarkastuksessa ilmitulevat vikatyypit

Visuaalisessa tarkastuksessa analysoidaan pinnoituksen 1 onnistuminen, piirilevyn leikkauksen onnistuminen sekä pinnoituksen 2 onnistuminen. Visuaalisen tarkastuksen saannot sekä hylättyjen tuotteiden hylkäyssyyt kirjaantuvat tietokantaan kuten FT-testauksenkin tapauksessa.

3.2 Tuotantoprosessiketjun testaukset, tarkastukset ja vialliset tuotteet

Tutkimuksen kohteena olevassa tuotantoprosessissa on käytössä anturitehtaalla komponenttitestaus, tuotantotilan puhdistilan funktionaalinen testaus sekä visuaalinen tarkastus tuotantotiloissa.

3.2.1 Komponenttitestaus

Komponenttitestaus suoritetaan valmistetuille antureille litografian ja muiden anturitehtaan puhdistilaprosessien jälkeen ennenkuin anturit kokoonpannaan alustalle. Tässä vaiheessa anturit ovat vielä kiekolla. Komponenttitestauksessa mittalaitteen neulat ottavat sähköisen kontaktin anturin pädeille ja testaavat yksitellen kunkin anturin toimivuuden. Esimerkiksi RTD:n toimivuus mitataan syöttämällä systeemiin virtaa ja määrittämällä jännitteen laskun avulla systeemin resistanssi. Tämän lisäksi AOI-systeemi tarkastaa, että anturin kuvioinnit ovat kohdallaan, ja AOI kuvaa ja tallentaa jokaisen anturin tiedot tietokantaan.

3.2.2 Funktionaalinen testaus ja jälkitarkastus

Funktionaalinen testaus on testityyppi sähköisestä testauksesta. Viitataan jatkossa kyseiseen testaukseen termillä FT-testaus. Tutkimuksen kohteena olevassa tuotantoympäristössä FT-testauksen mittalaitteisto toimii siten, että sen mittalaitteiston muotoillulle yksikköalustalle asetetaan mitattava yksikkölevy, joka sisältää kuusi yksikköä. Yksikköalustan muotoilu takaa, ettei levyä voida käytännössä asettaa sille väärin, sillä alustassa on levynmuotoinen syvennys hyvin pienillä toleransseilla. Kun levy on asetettu alustalle, sen päälle painautuu kansi, ja laitteiston neulat ottavat kontaktin yksikön pädeille. Mikäli levy on asetettu vinoon, levy vääntyy silminnähden eikä kantta ole helppo saada kiinni. Kun kansi on suljettu, mittausta käynnistetään tietokoneen kautta. Laitteisto mittaa yksiköstä jälleen viittä ominaisuutta A, B, C, D ja E, joista yksi on RTD:n resistanssi. Mikäli jokin tai jotkin ominaisuuksista ovat hyväksymisrajojen ulkopuolella, viallisen yksikkö hylätään tuotannosta. Kukin mittaustulos tallentuu tietokoneentietokantaan.

Jatkotutkimuksena tässä tutkimuksessa viallisesta yksiköstä irroitettiin aluksi A-anturi visuaalista tarkastamista varten. Koska tuotantoprosessissa on virallinenkin visuaalinen tarkastaminen, kutsutaan tätä visuaalista tarkastamista jälkitarkastukseksi selkeyden vuoksi. Jälkitarkastuksen tarkoituksena oli selvittää, mikä testin hylkäyksen juurisyy on. Aluksi tutkittiin vain A-anturin liitosta alustalle. B-anturin irroittaminen alustasta on käytännössä hankalaa, sillä se pienen kokonsa vuoksi katkeaa helposti. B-anturin irroittaminen otettiin kuitenkin tutkimuksen loppuvaiheessa käyttöön. Irrotettuja antureita kuvattiin Hirox HI-SCOPE Advanced KH-3000- ja OptoFidelity HD10 Full HD-1080 -mikroskoopilla.

Jälkitarkastuksen avulla voitiin tunnistaa hylättyjen yksiköiden suurimmat juurisyyt, kartoittaa kehityskohteita sekä kohdistaa monissa tapauksissa juurisyyt joko anturitehtaalalle tai tuotannon puhdashuoneelle. Juottumattomat flip chip:n metalliliitokset näkyivät mikroskoopin avulla, samoin kuin riittävän suuret naarmut tai muut huolettomasta mekaanisesta käsittelystä seuranneet vauriot anturin mittaavilla elementeillä. Lisäksi mikroskoopilla voitiin nähdä ajoittain litografian tai etsauksen epäonnistumisia, kuten oikosulkuja tai avoimia piirejä rakenteessa tai roskia sekä muita anturille kuulumattomia aineksia. Katkenneet tai irronneet anturit pystyttiin näkemään paljaalla silmällä jopa ilman anturin irroittamista tai mikroskooppia.

3.2.3 Visuaalinen tarkastus

Visuaalinen tarkastaminen suoritetaan virallisesti tuotantoprosessiketjussa pinnoitus 2:n jälkeen. Visuaalista tarkastuksesta kerättiin tietoa saannon tasosta sekä suurimmista hylkäyssyistä. Hylkäyssyiden luettelo on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3, Hylkäyssyiden koodausjärjestelmä

Hylkäyskoodi	Hylkäyssyy
1	Pinnoituksen 1 roiskuminen
2	Pinnoituksen 1 epätasaisuus
3	Pinnoituksen 2 leviäminen
4	Pinnoituksen 2 epätasaisuus
5	Epäonnistunut leikkaus 1
6	Pinnoituksen 1 ylimäärä ja pisarointi
7	Anturin vioittuminen
8	Muu syy
0	Useita syitä

Hylkäyskoodit 1 ja 2, eli pinnoituksen 1 roiskuminen ja epätasaisuus, voidaan havaita ultraviolettivalon ja mikroskoopin alla tarkastelemalla. Pinnoituksen 2 leviäminen ja epätasaisuus, eli hylkäyskoodit 3 ja 4, voidaan huomata usein ilman apuvälineitäkin, sillä pinnoituksella 2 on erotettava ominainen väri, mutta viimeistään epätäydellisyydet huomataan mikroskoopin alla. Myös syyt 5 ja 6 voidaan havaita paljaalla silmällä, kun taas syy 7 eli anturin vioittuminen vaatii yleensä mikroskoopilla tarkkailua. Tarkastelussa käytettiin samoja mikroskooppeja kuin jälkitarkastuksessa.

3.3 Minitab-ohjelmisto

Tutkimuksessa käytettiin Minitab 17 –ohjelmiston versiota 17.2.1. Minitab on ohjelmisto, joka on kehitetty tilastollisen datan analysointiin, jonka tavoitteena on tuotteiden ja palveluiden laadunparannus.⁴⁰ Ulkomuodoltaan se on yksinkertaisen näköinen taulukko-ohjelma, johon syötetään analysoitavat arvot. Minitabista löytyy paljon toiminnallisuuksia, sillä voidaan tuottaa tilastollisesta otoksesta erilaisia analyyssejä, kuten varianssianalyyssejä, sekä kuvaajia kuten aiemmin mainittuja histogrammeja ja paretokaavioita. Minitab suorittaa myös ”Toistettavuus ja uusittavuus” –tutkimuksen, eli niin kutsutun Gage R&R -analyysin, jonka avulla saadaan tietoa tutkimuksen kohteena olevan mittausjärjestelmän luotettavuudesta.

3.3.1 Toistettavuus ja uusittavuus –tutkimus (Gage R&R –tutkimus)

Mittauksen tulokseen vaihtelua tuo mitattavan kohteen luonnollinen vaihtelu sekä mittauslaitteistosta aiheutuva vaihtelu. Esimerkkitapauksena voidaan ottaa kapasitiivisen kosteusanturin kasvatetun ohutkalvon paksuuden mittaaminen yksittäisessä kohdassa. Luonnollinen vaihtelu on reaalinen kalvon paksuuden vaihtelu kiekon eri kohdissa. Mittalaitteiston aiheuttama vaihtelu taas voi ilmetä eri tuloksina samaa kohtaa mitattaessa. Tämä voi johtua laitteiston rakenteesta ja toimintaperiaatteesta.

R&R lyhenne tulee sanoista ”repeatability” ja ”reproducibility”. Repeatabilitylla viitataan siihen, kuinka paljon vaihtelua mittauslaitteisto itsessään tuottaa tuloksiin ja siitä käytetään jatkossa termiä toistettavuus.⁴¹ Jos siis sama operaattori mittaa tismalleen samalla tavalla samat osat, esimerkiksi tietokoneavusteisen optisen mittalaitteen avulla anturin pinta-alan, täydellisen mittalaitteen tapauksessa mittaustuloksien välillä ei tulisi olla vaihtelua, jolloin toistettavuus ei vaikuttaisi vaihteluun. Reproducibilitylla viitataan taas operaattoreiden aiheuttamiin mittaustulosten eroihin, viitataan tähän jatkossa termillä uusittavuus.⁴¹ Tällaista voi aiheuttaa esimerkiksi se, että eräs operaattori asettaa mitattavan kohteen eri tavalla mittauslaitteistoon tai paksuutta mitattaessa vetomittaa käyttäessä vääntää mittaa kireämmälle kuin toinen.

Gage R&R ilmaisee, kuinka paljon vaihtelua mittaustuloksissa on ja mistä komponenteista vaihtelu koostuu. Nämä mittausten vaihtelut koostuvat mitattavien kohteiden erojen lisäksi mittauslaitteesta johtuvasta vaihtelusta sekä mittauslaitetta käyttävistä operaattoreista johtuvasta vaihtelusta.⁴² Mikäli siis vaihtelu ei ole peräisin mitattavista kohteista, vaan se johtuu itse mittausproseduurista, on koko mittaamisen suorittaminen kyseenalaista. Gage-tutkimuksen tärkein tehtävä on varmistaa, että suoritettu mittaus on tarpeellinen ja kertoo juuri mitattavien kohteiden vaihtelusta.⁴¹

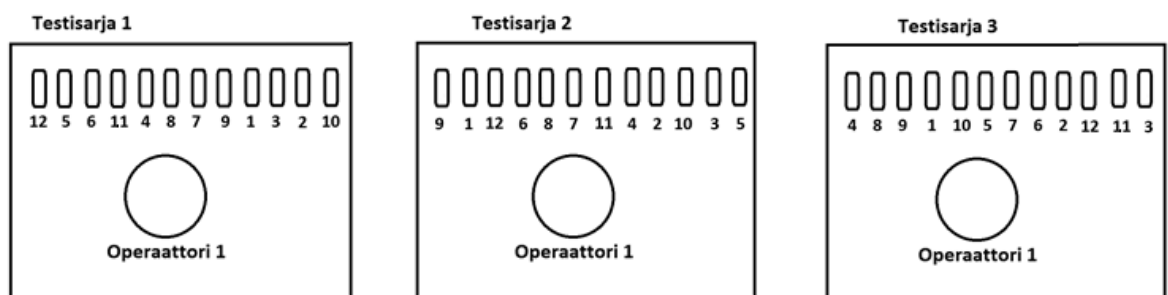
Gage R&R -tutkimus on keskeinen työkalu Six Sigma –projekteissa. R&R -tutkimus kohdistuu laatukriittisten tuotteen ominaisuuksien testaamiseen, toisin sanoen ominaisuuksiin, joiden on täytettävä asiakkaan vaatimukset. Nämä ominaisuudet ovat aina lähtökohtina, kun prosessien tehokkuuksia mitataan, parannetaan ja kontrolloidaan.

Gage R&R voidaan suorittaa jatkuvan tai diskreetin tuloksen tapauksessa. Mittalaitteen täytyy olla kalibroitu. Sillä on myös oltava riittävä erottelukyky eri arvojen välillä, esimerkiksi 10 arvoa toleranssirajan sisällä.⁴² Toleranssirajoilla tarkoitetaan niitä rajoja, joiden sisällä mitattavan tuotteen ominaisuuksien on oltava, jotta tuotteen katsotaan

täyttävän laatuvaatimukset. Tutkittavien näytteiden on edustettava hyvin prosessissa ilmenevää vaihtelua. Kymmenen näytettä on riittävän kokoinen otos Gage R&R:lle.⁴² Tuotteiden välinen vaihtelu on otettava huomioon; jos mittaukseen vaikuttaa esimerkiksi mittauskohda tuotteesta, tulee se huomioida ja tällaisista syistä johtuvat vaihtelut minimoida. Operaattoreita tulee olla riittävästi, vähintään kolme. Tutkimusta tehdessä tulisi sen ohjeistus dokumentoida ja operaattorit kouluttaa sen käyttämiseen oikein. Näytteille täytyy luoda satunnainen järjestys ja jokainen yksittäinen tuote tulisi mitata kolme kertaa, jotta tulokset olisivat riittävän informatiivisia ja luotettavia.

Usein tutkimuksessa käytetään kymmentä tai useampaa testattavaa näytettä. R&R -analyysi suoritettiin tässä koejärjestelyssä käytännön syistä kahdellatoista näytteellä. Nämä näytteet jokainen testaaja testasi sarjoissa kolme kertaa. Kahdentoista näytteen tapauksessa tuloksena on siis kolme 36:n näytteen testisarjaa. Näytteiden järjestys tulee pitää sattumanvaraisena ja numerointi tai muu merkintätapa tulisi pitää huomaamattomana, jotteivät testaajat tunnista ja muista näytteitä ja niiden aikaisempia tuloksia tai viallisuuksia.⁴²

Kuvassa 19 on esitetty Gage R&R -mittauksen periaate kahdellatoista näytteellä yhden operaattorin yhden kierroksen osalta. Tutkimuksessa kaikki kolme operaattoria suorittavat kuvan 19 mukaisen mittaussarjan kolme kertaa, jolloin jokaisella mittauskerralla mitattavien järjestys on satunnainen, eli se sekoitetaan kunkin mittauksen välillä.



Kuva 19, Yksi Gage R&R –tutkimuksen mittauskierros satunnaisella yksikköjärjestyksellä

3.4 Kustannusanalyysi

Koko prosessiketjun kustannuksista suoritettiin kustannusanalyysit teollisuusprosessien saantoa vastaavalla realistisella saantotasolla kutakin prosessivaihetta kohden. Näistä tiedoista laskettiin se, kuinka paljon kustannukset sitoutuu hylättäviin tuotteisiin saannon

nykytasolla. Saatua tulosta verrattiin prosessiketjun hukkakustannuksiin, kun saanto sellaiselle tasolle, jolle se potentiaalisesti voisi prosessien parannustoimenpiteiden jälkeen nousta. Tänä tasona pidettiin sitä, että kolme hylkäyssyytä saataisiin kokonaan eliminoidua prosessista. Nämä kyseiset hylkäyssyyt on valittu sen perusteella, että niiden aiheuttamien prosessin korjaaminen tai viallisten yksiköiden hylkääminen voisi realistisesti tapahtua tämän hetken tiedoilla ja taidoilla.

Analyysit yksinkertaistettiin koostumaan vain materiaali- ja työvoimakustannuksista. Analyysistä jätettiin huomioimatta työstö- ja kalustokustannukset, sillä työstöä ei laitteisiin nimettävästi ole tarvittu ja kalustot on jo lähestulkoon poistettu tilinpäätöksissä. Tästä syystä kunkin prosessivaiheen kustannukset lasketaan kaavalla 19, joka siis koostuu työvoiman kustannuksista sekä materiaalikustannuksista.

$$C_p = C_L + C_M \quad (19)$$

C_L ja C_M on määritelty aiemmin kaavojen 6 ja 7 yhteydessä.

Käytännössä prosessiketjun osia hoitaa kaksi operaattoria. Ensimmäinen operaattori hoitaa prosessia vaiheiden ”Sarjanumeron kirjoitus piirilevylle” ja ”Funktionaalinen testaus” välillä. Toinen operaattori hoitaa prosessia siitä eteenpäin eli ”Piirilevyn leikkaus 2” ja ”Piirilevyn leikkaus 3” välillä. Kutsutaan ensimmäistä prosessiväliä prosessiketju 1:ksi ja toista prosessiketju 2:ksi. Koska kaikki yksiköt käsitellään samalla tavalla, ja osa prosesseista on automatisoitu ja ne toimivat rinnakkain, voidaan työkustannukset jakaa kahdelle prosessiketjulle niiden vaatiman työpanoksen mukaan. Käytännössä siis vaikka tuote olisi todettu toimimattomaksi jo esimerkiksi FT-testauksen yhteydessä, se kulkee silti prosessiketjun lävitse kaikkien seuraavien vaiheiden läpi. Prosessien rinnakkain toimimisella tarkoitetaan sitä, että joissain prosesseissa on jatkuva syöttö, eli sinne tulee kokoajan jonossa uusia yksiköitä käsiteltäviksi ja samalla käsiteltyjä yksiköitä poistuu. Näistä syistä kustannukset yksikköä kohden voidaan jakaa prosessiketjussa 1 kaavan 20 mukaisella tavalla.

$$\begin{aligned} \frac{C_{\text{prosessiketju1}}}{\text{yksikkö}} &= \frac{C_{\text{prosessiketju1}}}{N_{\text{yksiköt}}} = \frac{C_L + C_M}{N_{\text{yksiköt}}} \\ &= \frac{N_{\text{oper.}} * N_{\text{työtunnit}} * C_{\text{työ}} + N_{\text{yksiköt}} * (C_{\text{alusta}} + C_{\text{anturi A}} + C_{\text{anturi B}})}{N_{\text{yksiköt}}} \end{aligned} \quad (20)$$

Kaavassa 20 $N_{oper.}$ on tarvittavien operaattoreiden määrä, $N_{työtunnit}$ on tarvittavien työtuntien määrä, $C_{työ}$ on työn tuntikustannus, $N_{yksiköt}$ on tuotettujen yksiköiden määrä ja C_{alusta} on alustan yksikköhinta, ja antureiden vastaavasti.

Prosessiketjussa 2 kustannukset tuotettua yksikköä kohden lasketaan kaavan 21 mukaan.

$$\frac{C_{prosessiketju2}}{yksikkö} = \frac{C_{prosessiketju1}}{yksikkö} + \frac{N_{oper.} + N_{työtunnit} + C_{työ} + N_{yksiköt} * (C_{pinnoitus1} + C_{pinnoitus2})}{N_{yksiköt}} \quad (21)$$

Kaavassa 21 $N_{oper.}$, $N_{työtunnit}$, $C_{työ}$ ja $N_{yksiköt}$ ovat määritelty kuten kaavassa 20, ja $C_{pinnoitusX}$ on pinnoituksen X kustannus koko pinnoitusprosessia kohden.

Prosessien kustannukset kertovat, kuinka paljon prosessiketjun suorittamiseen kuluu rahaa, ja eräänä kiinnostuksen kohteena on se, kuinka paljon lisäkustannuksia syntyy hylättyjen tuotteiden vuoksi.

Hukkakustannukset C_{scrap} lasketaan kaavan 22 mukaisesti, jossa on kaavoissa 20 ja 21 lasketut prosessiketjujen yksikkökohtaiset kustannukset kerrottuna hylättyjen tuotteiden määrällä, N_{scrap} .

$$C_{scrap} = \left(\frac{C_{prosessiketju1}}{yksikkö} + \frac{C_{prosessiketju2}}{yksikkö} \right) * N_{scrap} \quad (22)$$

Kaavaa 22 käyttämällä saannon eri tasoilla, jolloin N_{scrap} -arvo muuttuu, voidaan laskea saannon tason nostamisen vaikutus hukkakustannuksiin C_{scrap} .

4 Tulokset

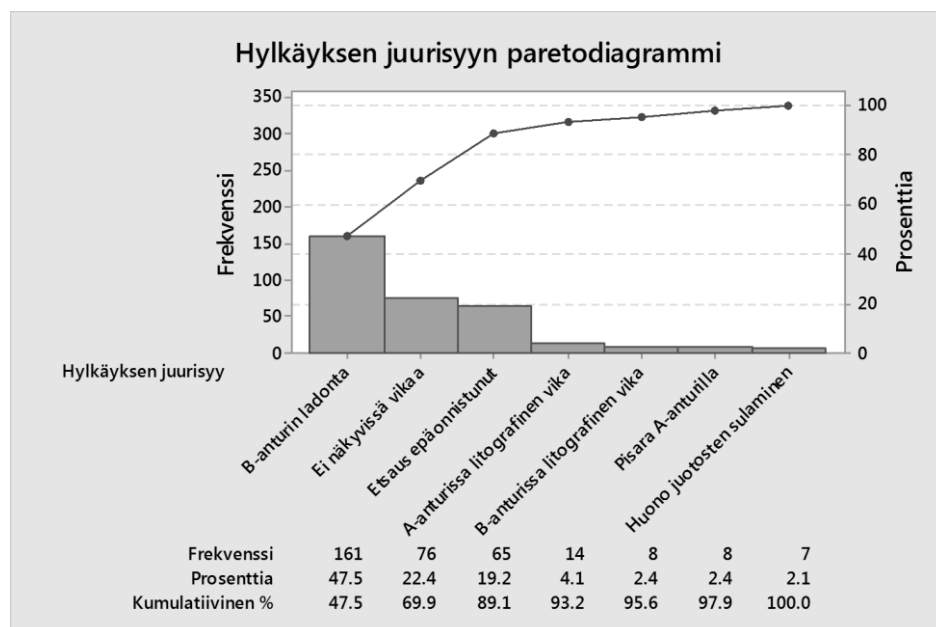
Tulokset-osiossa käydään läpi ensin FT-testauksen avulla saadut tulokset hylättyjen yksiköiden hylkäyssyistä kahdelta eri aikajaksolta. FT-testauksen luotettavuutta analysoidaan lisäksi Gage R&R -tutkimuksen avulla. Hylkäyssyiden analyysi tehdään visuaalisen tarkastuksen hylkäyssyiden tilastoille kahdella eri aikajaksolla. Näiden aikajaksojen välillä tehtiin prosessimuutos, joka vaikutti osaltaan eri lähteistä johtuvien hylkäyssyiden määriin. Lisäksi kustannusanalyysin avulla laskettiin potentiaaliset säästöt, mitkä saataisiin toteutettua, jos realistisesti poistettavissa olevat hylkäyssyyt saataisiin FT-testauksessa poistettua ja visuaalisessa tarkastuksessa päästäisiin eroon kaikista pinnoitukseen 1 liittyvistä ongelmista.

4.1 FT-testauksen hylätyt yksiköt ja niiden juurisyyn

FT-testauksen hylättyjen yksiköiden hylkäyssyiden tilastoja seurattiin kahdella erillisellä testausjaksolla ja kukin hylkäyssyy kohdistettiin joko anturitehtaan tai tuotannon puhdastilan valmistusprosesseihin.

4.1.1. Ensimmäinen testausjakso

FT-testauksessa hylättyjä yksiköitä jälkitarkastettiin ennaltamäärätyltä, useamman päivän ajalta. Yksityiskohtaiset tulokset on esitetty kuvassa 20.



Kuva 20, Ensimmäisen testausjakson hylättyjen yksiköiden hylkäyssyyt FT-testauksessa

Tuloksissa suurimpana hylkäyssyynä on B-anturin ladonta, selvittämätön vika ja kolmanneksi suurimpana syynä on epäonnistunut etsaus. Mikäli tulokset lajitellaan vielä

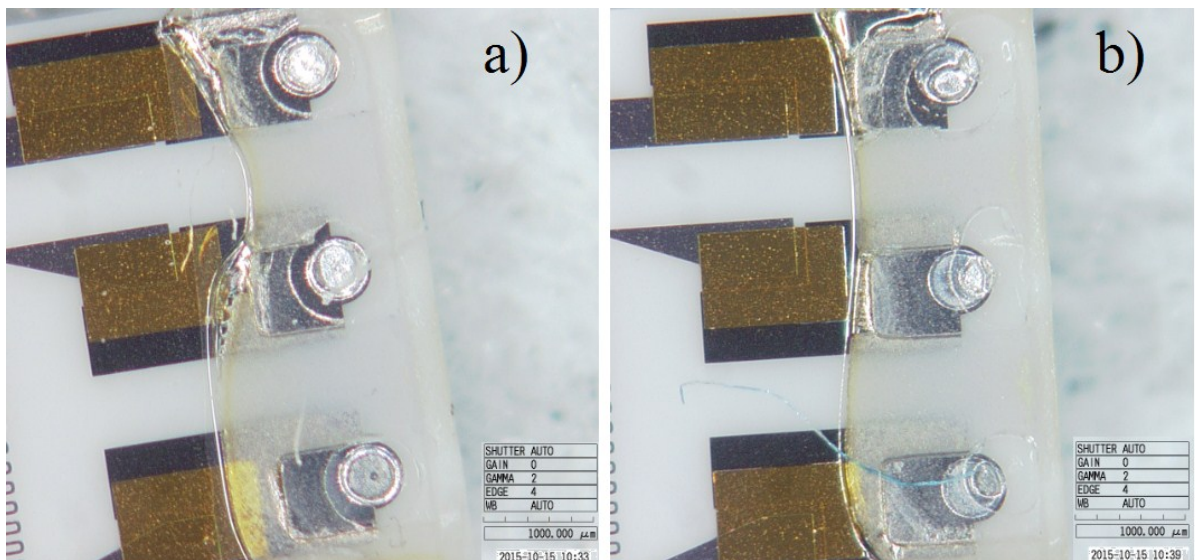
edelleen niin, että juurisyyt kohdistetaan joko anturitehtaalte tai tuotannon puhdashuoneelle saadaan taulukon 4 mukainen jaottelu. ”Ei näkyvissä vikaa” –juurisyy on jätetty analyysin ulkopuolelle, sillä kyseisiä vikoja ei voida luotettavasti kohdistaa kummallekaan osastolle.

Taulukko 4, Hylkäyssiiden lista ja syiden kohdistaminen niiden tuotantotilaan

Anturitehtaan laatuviokoja		Tuotannon puhdashuoneen laatuviokoja	
Etsaus epäonnistunut	65	B-anturin ladonta	161
A-anturissa litografinen vika	14	Tunnistamaton pisara A-anturilla	8
B-anturissa litografinen vika	8		
Vajavainen juotosten sulaminen	7		

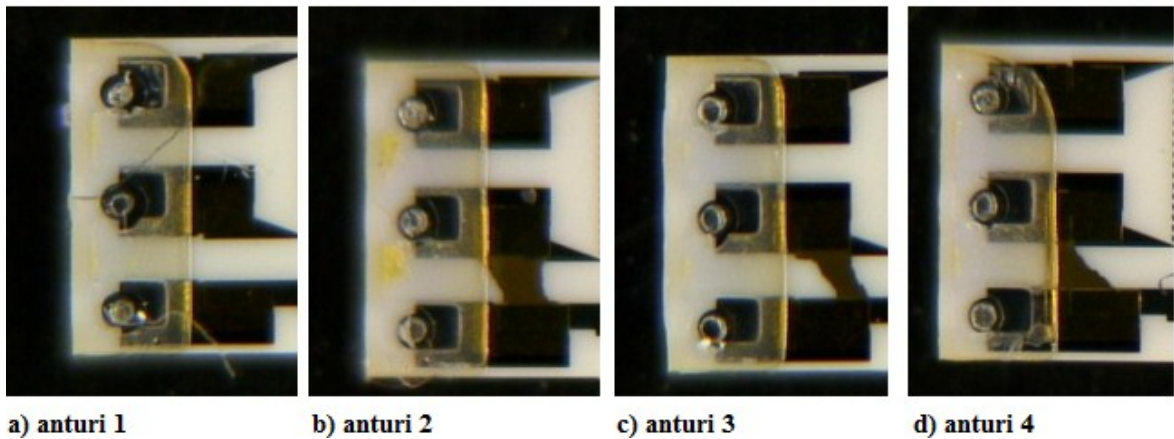
”Ei nähtävissä visuaalista vikaa” -syy on kuitenkin hylkysyissä suurena osuutena, minkä vuoksi tällaisia viallisia yksiköitä päätettiin alkaa tutkimaan tarkemmin toisella testausjaksolla.

Molemmilla testausjaksoilla A-anturit irroitettiin alustastaan ja juotosnystyjen ulkonäköä tutkittiin. Kuvassa 21 on esitetty muutama yleinen anturin juotosnystyn ulkonäkö alustalta irroittamisen jälkeen Hirox-mikroskoopilla kuvattuna.



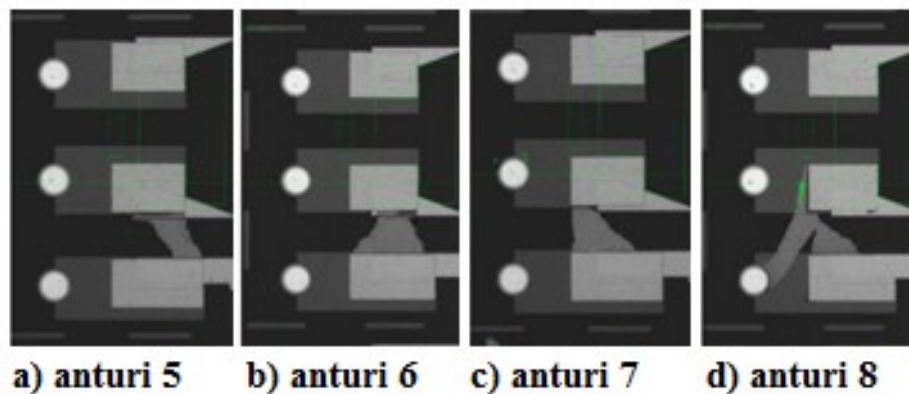
Kuva 21, Mikroskooppikuvat antureiden juotosnystyjen ulkonäöstä alustalta irroittamisen jälkeen: a)-kuvassa esimerkki tasaisesta nystyn sulamisesta, b)-kuvassa juotosnysty on sulanut vain osittain painoittuen oikealle puolelle pädiä

Kuvassa 22 on mikroskooppikuvia antureista ja samasta yksityiskohdasta kuin kuvassa 21.



Kuva 22, Mikroskooppikuvia antureiden pädeistä: a)-kuvassa anturin kolme pädiä ovat irrallaan toisistaan, kuvissa b), c) ja d) kahden alimman pädin välillä on kontakti

Kuvassa 22 voidaan nähdä normaalin toimivan anturin, jollainen anturi 1 on, ulkonäkö kahden alimman pädin suhteen. Anturilla 1 olevat epämääräisyydet ovat säilytyksestä johtuvia epäpuhtauksia. Kuvan 22 antureissa 2, 3 ja 4 voidaan nähdä kahden alimman pädin välillä kontakti. Anturit kuvataan myös anturitehtaalla AOI-tarkastuksen yhteydessä. Kuvassa 23 on esitetty anturitehtaan AOI-kuvat neljästä anturista, jotka ovat kuvan 22 viallisten antureiden 2, 3 ja 4 kaltaisia ulkonäöltään sekä FT-testauksen hylkäysyyden perusteella. Ne kaikki ovat hylkäytyneet ominaisuuden E sopimattomuudesta hyväksymisrajoihin FT-testauksessa. Nämä tiedot saatiin selville, kun sarjanumeron perusteella jäljitettiin anturitehtaan testituloksia tietokannasta.



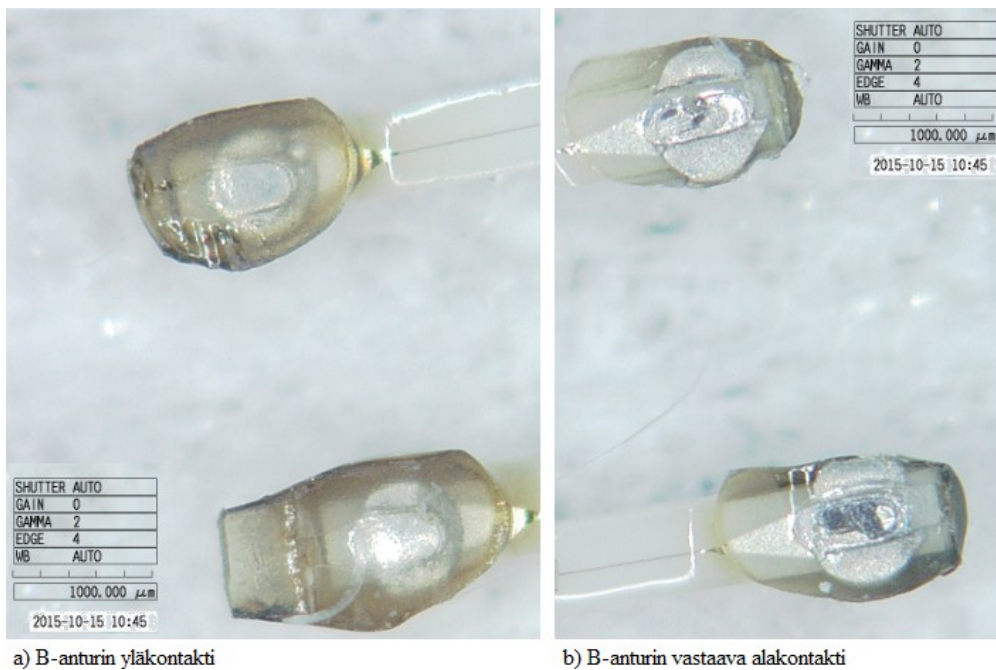
Kuva 23, Anturitehtaan AOI-tarkastuksen kuvia anturipädeistä, kaikissa kuvissa näkyy vaaleanharmaalla kontakti anturin kahden alimman pädin välillä

4.1.2. Toinen testausjakso

Tarkempi tutkimus tunnistamattomille vikasyille aloitettiin toisella testausjaksolla, joka oli myös useamman päivän pituinen jakso. A-antureiden suhteen toisella tarkkailujaksolla

kontaktikohdat olivat yhtenevän näköisiä ensimmäisen tarkkailujakson kuvattujen A-antureiden kanssa. Tällä testausjaksolla tarkasteltiin kuitenkin tarkemmin näidenkin antureiden nystyjen sulamisen jälkeistä ulkonäköä, erityisesti huomiota kiinnitettiin sulamisalueen sijoittumiseen suhteessa anturin pädiin. FT-testauksessa hylkääntyneitä yksiköitä tutkittiin jälleen mikroskoopin avulla, tällä kertaa myös pienemmät B-anturit irroitettiin manuaalisesti, jotta voitiin mahdollisesti nähdä B-anturin juotosnystyjen sulaminen tai sulamattomuus alustan pädille.

Kuvassa 24 on kahden B-anturin ulkonäkö ylhäältäpäin kuvattuna. Kuvat 21 ja 24 on otettu Hirox-mikroskoopilla.



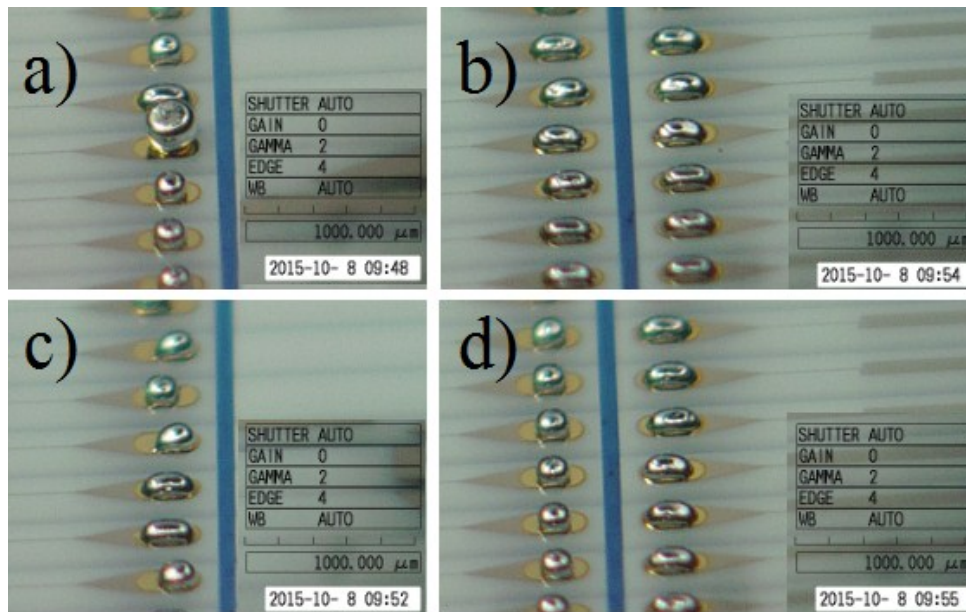
a) B-anturin yläkontakti

b) B-anturin vastaava alakontakti

Kuva 24, Irroitettuja B-antureita suoraan ylhäältä pain kuvattuna, a)-kuvassa juotosnysty ei ole kiiltävä, b)-kuvassa juotosnysty on kiiltävä ja näyttää litistyneen

Kuvassa 24 on vieretysten saman anturin ylä- sekä alakontaktipää. Lisäksi tällä testausjaksolla kuvattiin antureiden nystyjen ulkonäköä kiekolla.

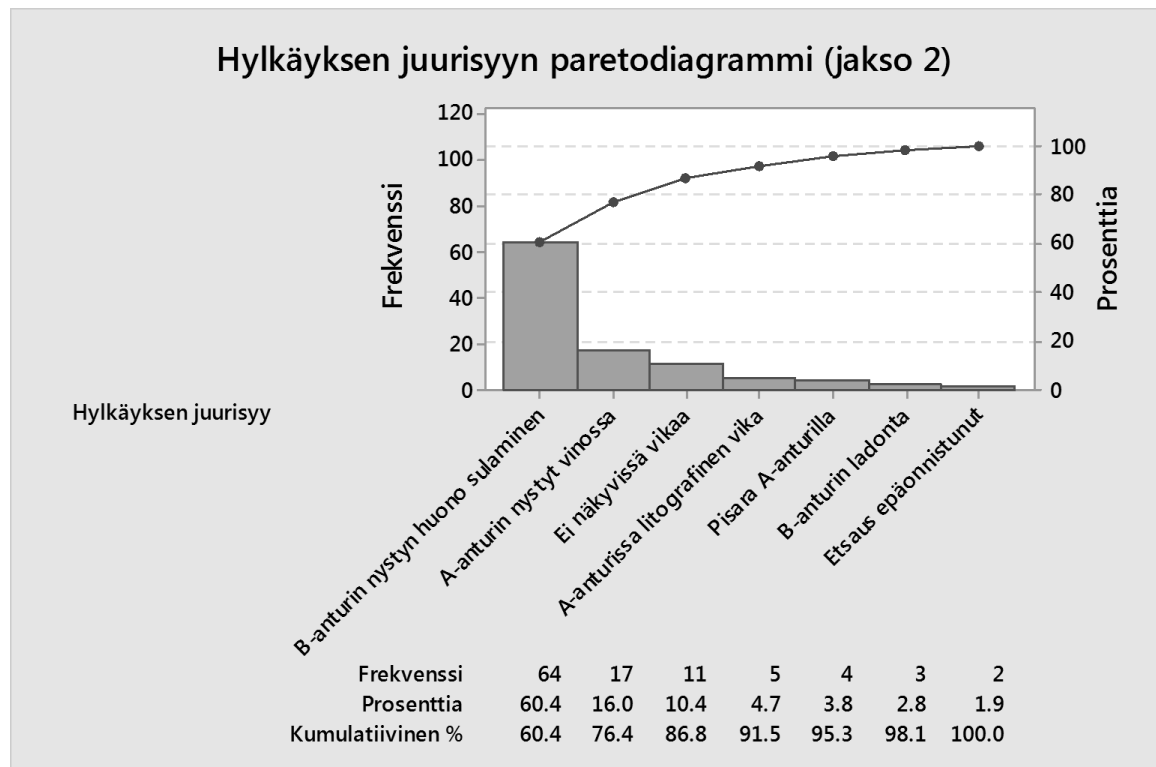
Kuvia nystytetyistä kiekkoista on esitetty kuvassa 25 sivulta viistosta kuvattuna Hirox-mikroskoopilla.



Kuva 25, B-anturin nystyjä kiekolla rivissä viistosta kuvattuna: a)-kuvassa on huomattavia nystyjen kokoeroja varsinkin korkeussuunnassa, b)-kuvassa nystyt ovat keskenään samankokoisia ja yhtä korkeita, c)-kuvassa nystyjen paikoitus vaihtelee huomattavasti ja d)-kuvassa nähdään vierekkäisten rivien välistä korkeusvaihtelua

Kuvan 25 perusteella nystyjen välillä on kokoeroja sekä nystyt ovat sijoittuneet hieman eri kohtaan pädiä. Varsinkin korkeus- sekä muotoeroja voidaan havaita nystyjen välillä. Muotoeroista hyvänä esimerkkinä on kuvan 25 d)-kohta, jossa vasen nystyrivistö on muodoltaan pyöreää, kun taas oikea rivistö on enemmänkin ovaalinmuotoista. Tästä seuraa korkeusero, eli pyöreät nystyt ovat korkeampia kuin ovaalit. Kohdassa c) voidaan nähdä lisäksi nystyjen sijoittelun eroja. Esimerkiksi kohdan c) ylimmät pyöreäähköt nystyt eivät ole linjassa toisiinsa nähden verrattuna kohdan d) vasempaan suoraan rivistöön.

Kuvassa 26 on paretodiagrammi hylkäyssyistä jälkimmäiseltä ajanjaksolta. Uusiksi syiksi on lisätty ”B-anturin nystyn huono sulaminen” ja ”A-anturin nystyt vinossa”.

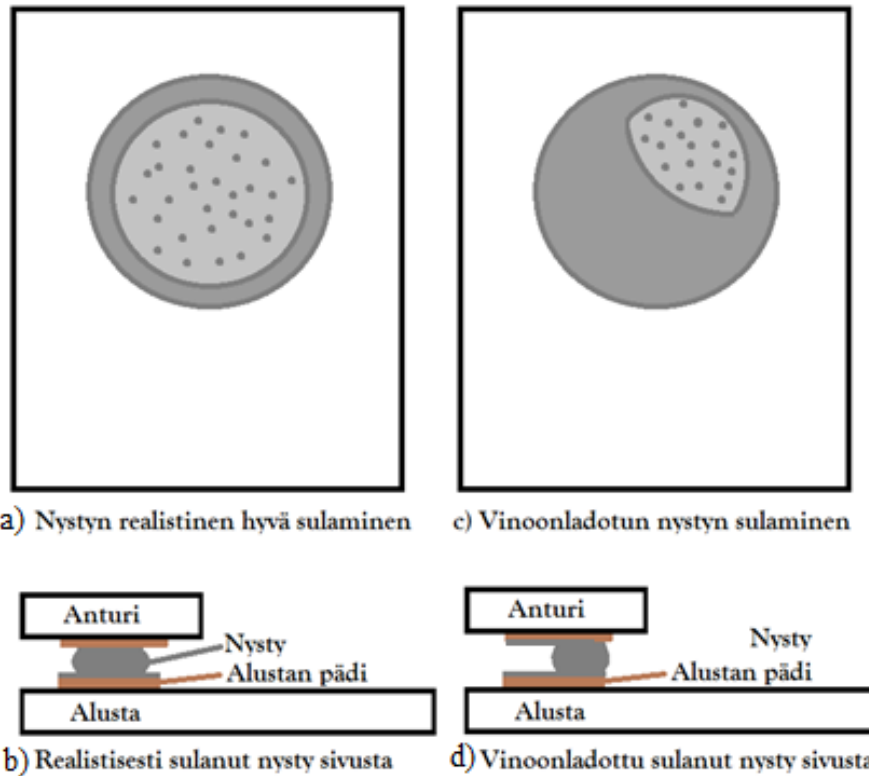


Kuva 26, Toisen testausjakson hylkäyssyyt FT-testauksessa

B-anturin nystyn huono sulaminen syy voitiin havaita irrottamalla B-anturi varovasti alustasta ja A-anturin nystyn vinous samoin anturi irrottamalla. B-anturin tapauksessa sulamattomuus voitiin havaita siten, että B-anturin juotosnysty ei ollut kostuttanut alustan kuparipädiä, vaan pädi oli täysin kuparin värinen, lisäksi anturin nystyn ulkonäkö poikkesi sulaneen nystyn ulkonäöstä. Jokaisessa tapauksessa toinen nysty oli kostuttanut pädinsä, jolloin ero näiden kahden kostutetun ja kostuttamattoman pädin välillä oli mikroskoopilla silminnähtävä.

A-anturin nystyn vinous voitiin havaita näkemällä sulamisjäljen olevan epäsymmetrinen.

A-anturin nystyjen sulamistilannetta havainnollistetaan kuvassa 27.



Kuva 27, Juotosnystyn ulkonäkö sulamisen jälkeen erilaisten sulamistilanteiden jäljiltä

Kuvassa 27 a) ja b) pisteillä merkitty alue on alue, joka on sulattuaan kontaktissa sekä alustaan että anturiin. Näissä kuvissa havainnollistetaan miltä alustan pään alue näyttää nystyn sulamisen ja anturin irroittamisen jälkeen. Realistisesti hyvin sulanut nysty on kuten kuvassa a) ja b) on esitetty, tämän näköisessä tilanteessa sulamista voidaan pitää onnistuneena ja kontakti toimii kuten sen kuuluukin. Vinosti ladotun nystyn sulamisen jälkeinen ulkonäkö on esitetty kuvassa c) ylhäältä päin ja d) sivusta. Huomattavaa on, että vaikka nysty on vinoon ladottu tai ei sula ideaalisti, se silti kostuttaa koko alustan sekä anturin pään, jolloin ne ovat kuparisen värin sijasta täysin juotteen peitossa eli hopeanvärisiä. Kuitenkin juotosnystyn pieni osa, joka on varsinaisessa sähköisessä ja mekaanisessa kontaktissa näkyy selkeästi kuvan c) osoittamalla tavalla.

B-anturin huonon sulamisen paljastivat ulkonäön lisäksi FT-testauksen mittausarvot, jotka antoivat resistanssin arvot niin suuriksi, että ne olivat testausohjelman maksimiarvossa.

4.2 FT-testauksen Gage R&R –tutkimus

Gage R&R -tutkimus suoritettiin funktionaalisen testauksen mittalaitteistolle. FT-laitteisto mittaa valmistetuista anturi-alusta-yksiköistä viittä sähköistä ominaisuutta A, B, C, D ja E. Jokaisen ominaisuuden mittaustuloksia ja niiden luotettavuutta käsiteltiin tutkimuksessa erikseen. Mittaustuloksista suoritettiin Minitab-ohjelmiston avulla Gage R&R -analyysi, ja tulosten kuvaajat ja raportit on esitetty ominaisuuden A suhteen kuvissa 28 ja 29, ja muiden neljän ominaisuuden analyysitulokset löytyvät liitteistä kuvista 36-43. Kootut tulokset Gage R&R -tutkimuksesta on esitetty taulukossa 5.

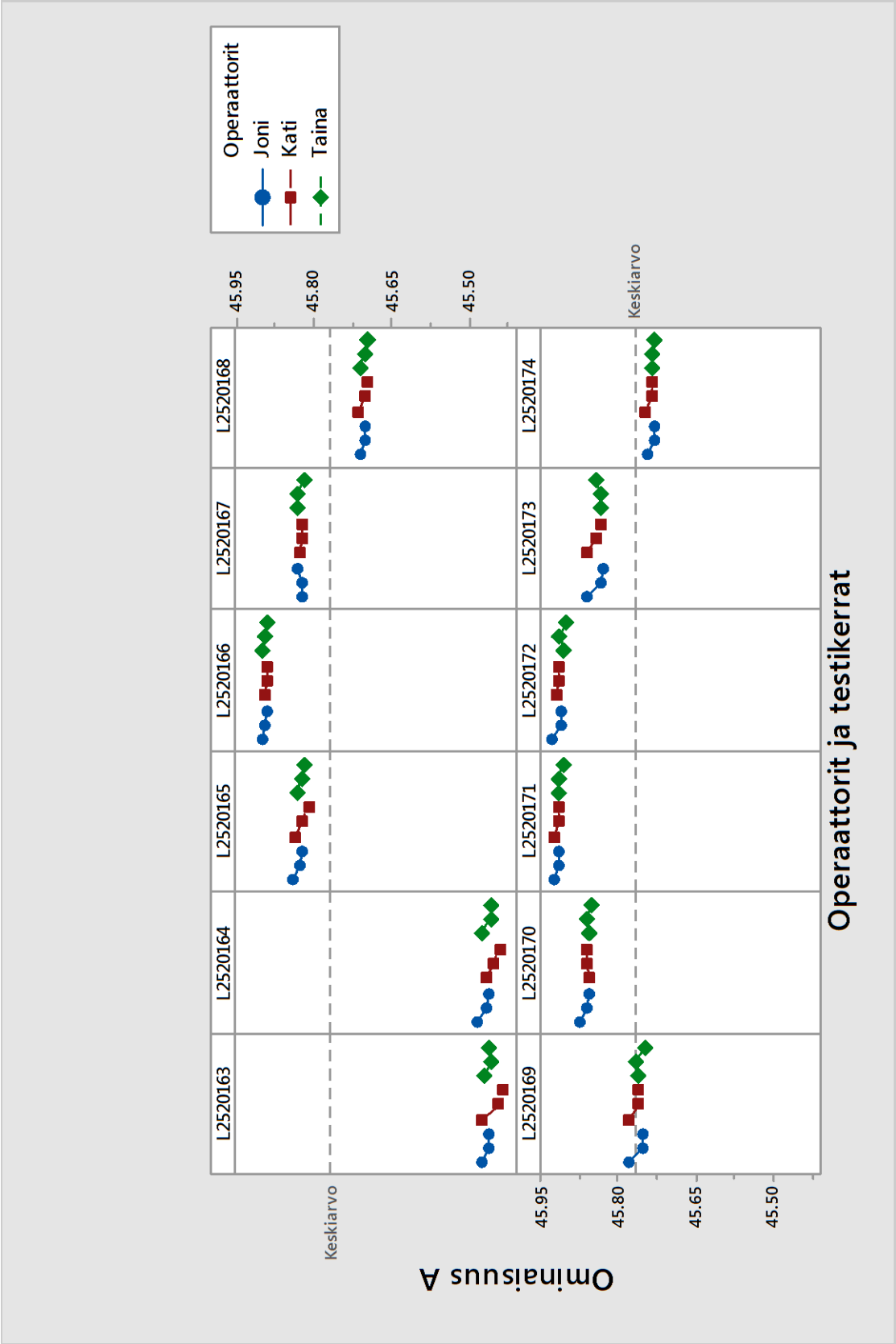
Taulukko 5, *Gage R&R –mittauksen tulokset ominaisuuksille A, B, C, D ja E*

Ominaisuus	Yksiköiden välinen	Toistettavuus	Uusittavuus
A	99.68	0.31	0.01
B	98.27	1.64	0.1
C	99.84	0.15	0.01
D	99.39	0.61	0
E	98.5	1.46	0.04

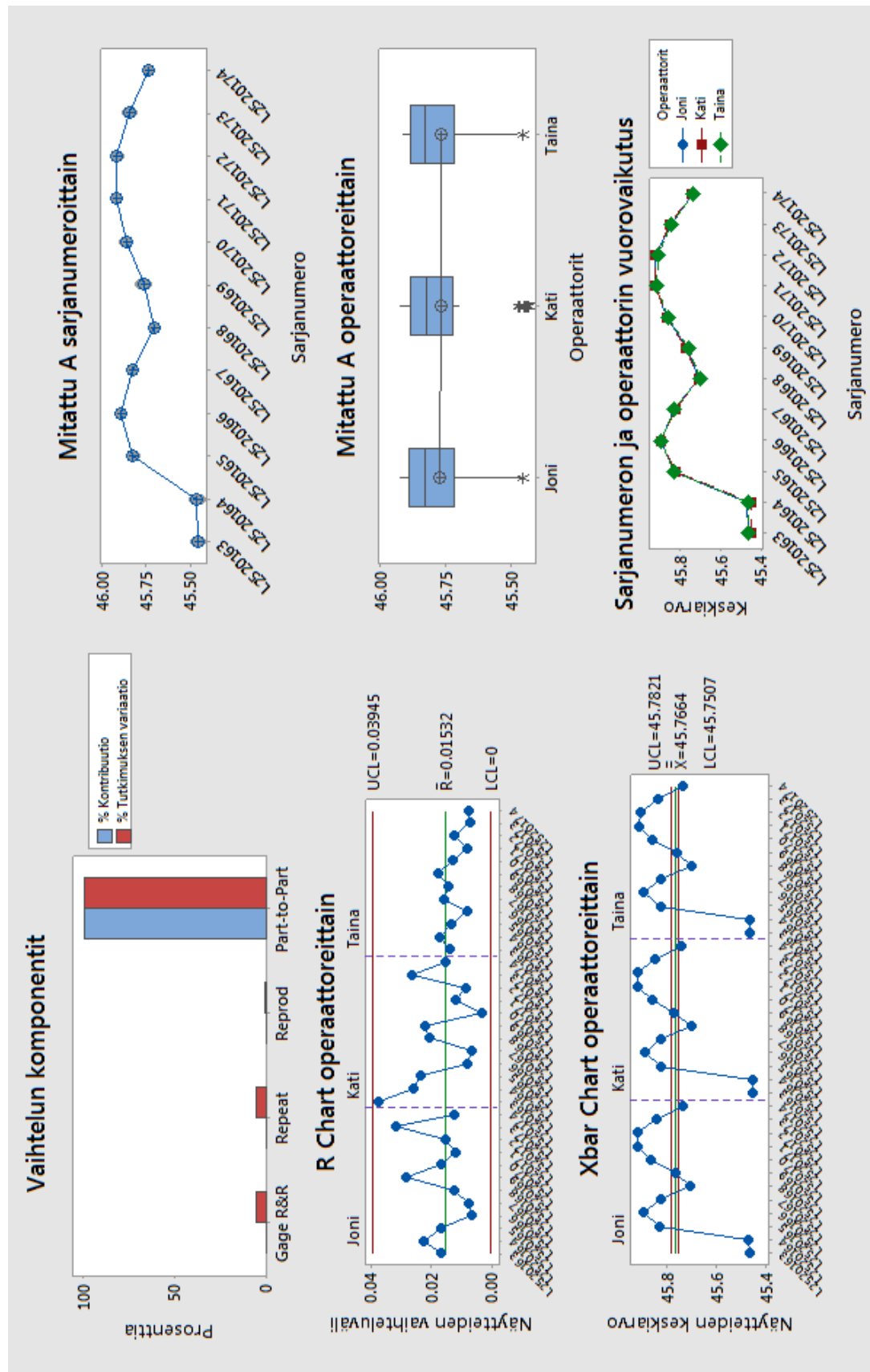
Kaikkien ominaisuuksien suhteen yksiköiden välinen vaihtelu selitti tutkimuksen kokonaisvaihtelusta vähintään 98 %. Taulukosta nähdään, että kaikkien ominaisuuksien suhteen toistettavuus oli seuraavaksi suurin vaihteluun vaikuttava tekijä sekä viimeisenä vaikuttajana oli uusittavuus. Kuvan 28 mukaisessa taulukossa on esitetty kunkin operaattorin tekemät kolme mittausta kutakin mitattavaa tuotetta kohden. Esimerkiksi ensimmäistä tuotetta L2520169 kohden nähdään ensimmäiseksi operaattorin ”Joni” tekemät kolme mittausta sinisellä, toisena punaisella operaattorin ”Kati” ja kolmantena vihreällä operaattorin ”Taina” tekemät kolme mittausta ominaisuuden A suhteen.

Kuvassa 29 ”Vaihtelun komponentit” –kuvaaja esittää saman tiedon kuin taulukon 5 ensimmäinen rivi, eli mistä komponenteista mittauksen vaihtelu koostuu. ”R Chart operaattoreittain” -kuvaaja näyttää kuinka paljon kunkin operaattorin yhden tuotteen kolmen mittauksen välillä on vaihtelua. Suuri luku kertoo, että saman operaattorin mitatessa samaa tuotetta mittaustulos vaihtelee. ”Xbar Chart” -kuvaaja näyttää mittauksen keskiarvon kunkin operaattorin mittaamaa tuotetta kohden. Mikäli arvot ovat operaattorista riippumatta samoja kuitenkin tuotetta kohden, mittauslaitteiston voidaan katsoa olevan riippumaton operaattorista. ”Mitattu A sarjanumeroittain” -kuvaaja näyttää ominaisuuden A arvon kutakin tuotetta kohden huomioimatta operaattoria. Mikäli kuvaajassa pisteet sijoittuvat päällekkäin kuten kuvan 29 tapauksessa, mittauslaitteisto

antaa samalle tuotteelle samansuuruisen A :n arvon. ”Mitattu A operaattoreittain” - kuvaaja näyttää, kuinka mitattujen tuotteiden mittaustulokset asettuivat operaattorikohtaisesti. Sininen palkki näyttää mitta-alueen, jolla tulokset asettuivat, ja keskellä sijaitseva pallo kuvaa mittausten keskiarvoa. Kuvassa 29 palkkien alla olevat tähdet kuvaavat selkeästi tulosmassasta poikkeavia mittaustuloksia (engl. *outliers*).



Kuva 28, Ominaisuuden A FT-testauksen Gage R&R -tuloksien kuvaaja

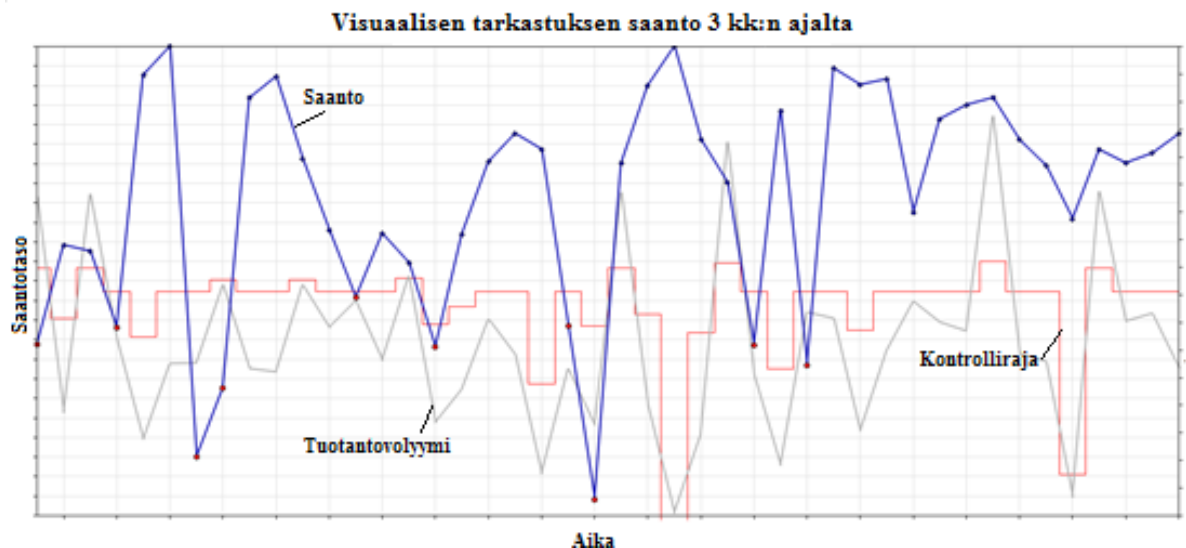


Kuva 29, Gage R&R -raportti ominaisuuden A testaamiselle FT-testissä

4.3 Visuaalinen tarkastus, sen saannon kehitys ja suurimmat vikasyyt

Visuaalinen tarkastaminen paljastaa aiemmin mainitut, taulukosta 3 löytyvät, prosessien epäonnistumiset. Visuaalinen tarkastaminen on ollut tuotannossa käytössä tuotteen valmistamisen aloituksesta lähtien, mutta hylkäyssyiden tietokanta, jonne hylkäyssyyt ja sarjanumerot tallentuvat, otettiin käyttöön vasta vuoden päästä varsinaisen tuotannon aloittamisesta.

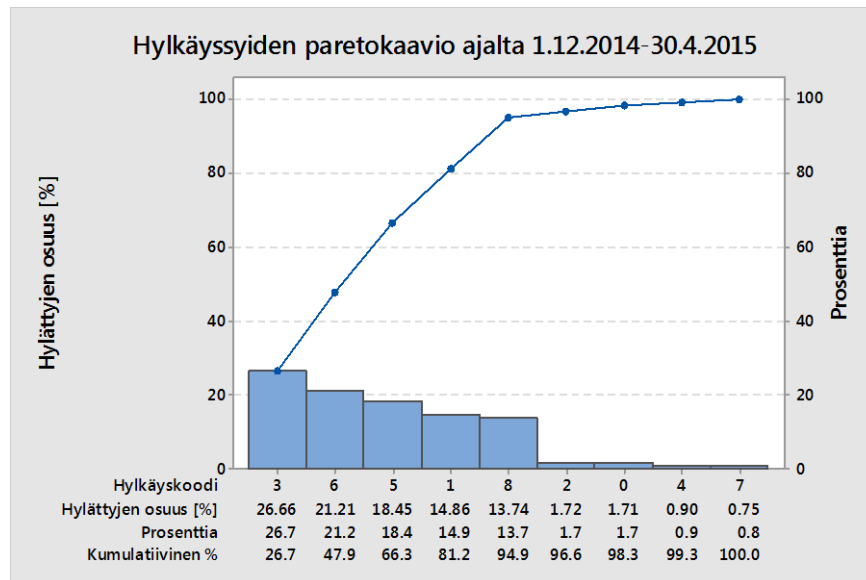
Visuaalisen tarkastamisen saanto on vaihdellut paljon, on ollut jopa useita viikkoja, jolloin saanto on ollut 100 %, toisaalta taas saanto on ajoittain laskenut seurantakaavioissa kontrollirajan alle, jonka vuoksi hylkäyssyihin on ollut syytä perehtyä. Kuvassa 30 on esitetty saannon seurantakaavio satunnaiselta kolmen kuukauden ajalta. Kontrollirajat, jotka näkyvät kaaviossa punaisella, on laadittu tuotantovolyymilla korjattuna tälle tarkastukselle, mistä johtuen kontrollirajat eivät ole jatkuvaa suoraa viivaa.



Kuva 30, Visuaalisen tarkastuksen saanto- ja volyymikaavio kolmen kuukauden ajalta

Hylkäyskoodi 3, eli pinnoitus 2:n leviäminen, dominoi hylkäyssyiden listaa ajalla 1.12.2014-30.4.2015.

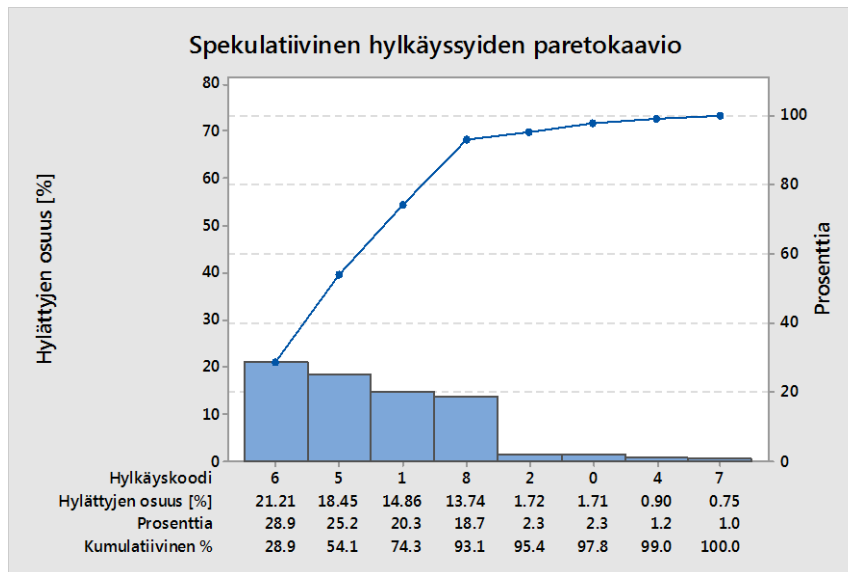
Aikavälin 1.12.2014-30.4.2015 hylkäyssyiden paretokaavio on nähtävissä kuvassa 31. Paretokaaviosta voidaan lukea kuinka suuresta osuudesta hylättyjä tuotteita kukin hylkysyy vastaa ja kaaviossa on myös esitetty syiden kumulatiivinen prosentti suurimmasta vikasyystä lähtien.



Kuva 31, Visuaalisen tarkastuksen hylkäyssyiden paretokaavio ensimmäiseltä tarkastelujaksolta

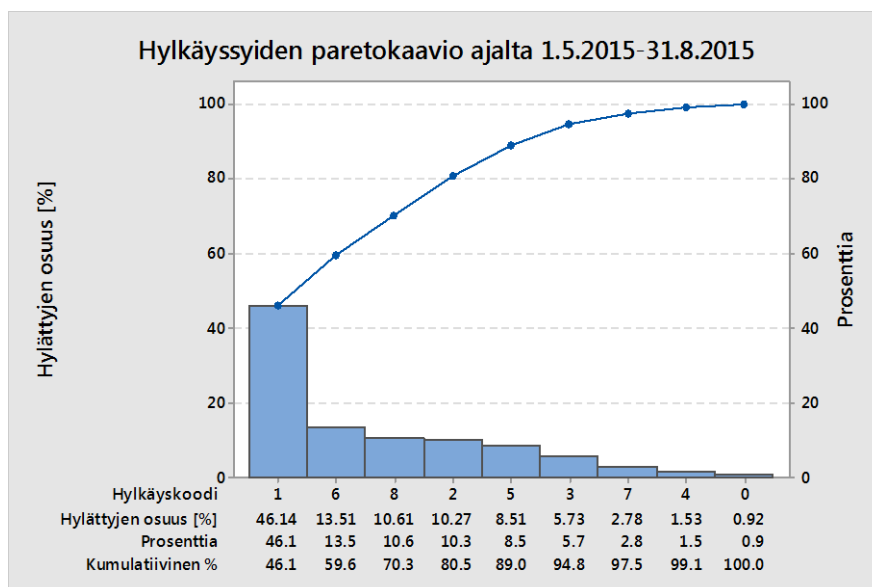
Kuvan 31 kuvaajasta voidaan nähdä, että pelkästään pinnoituksen 2 leviäminen, eli hylkäyssyy 3, vastaa reilusta neljäsosasta kaikista vioista. Seuraavaksi suurimpina syinä oli pinnoitus 1:n ylimäärä ja pisaroituminen, epäonnistunut leikkaus 1, pinnoituksen 1 roiskuminen ja muut syyt. Mikäli hylkäyssyy 3 saataisiin eliminoidua, potentiaalisesti paretokaaviossa olisi enää neljä selkeää vikasyystä kuvan 31 kaavion viiteen suureen hylkäyssyyhyyn verrattuna.

Hylkäyssyyn 3 poistuessa täysin paretokaavio näyttäisi spekulatiivisesti kuvan 32 mukaiselta.



Kuva 32, *Spekulatiivinen paretokaavio hylkäyssyyn 3 poistumisen myötä*

Maskit poistettiin tuotannosta 31.4.2015 ja seuraavalta neljältä kuukaudelta kerättiin jälleen tilastollista dataa hylkäyssyistä. Hylkäyssyiden paretokaavio ajalta 1.5.2015-31.8.2015 on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33, *Visuaalisen tarkastuksen hylkäyssyiden paretokaavio toiselta tarkastelujaksolta*

Kuvan 33 kuvaajasta voidaan huomata, että hylkäyssyy 3, eli pinnoituksen 2 leviäminen väheni huomattavasti. Kyseisen syyn osuus hylätyistä yksiköistä väheni reilusta 26 prosentista alle kuuteen prosenttiin. Kuten kuvaajia vertailemalla voidaan huomata,

kuvan 33 kuvaaja eroaa melkoisesti spekulatiivisesta kuvaajasta 32, erityisesti voidaan huomata että hylkäyssyy 1, eli pinnoituksen 1 roiskuminen on lisännyt huomattavasti osuuttaan ja seuraavaksi suurimmat hylkäyssyyt ovat vaihtaneet järjestystään verrattuna kuvaajaan 31. Seuraavaksi suurin hylkäyssyy on koodilla 6, eli pinnoituksen ylimäärä ja pisarointi. Syyllä 8, eli muulla syyllä, hylätyt yksiköt ovat kolmanneksi suurimpana hylkäyssyyinä eikä niiden tarkemmasta luokittelusta voida jälkikäteen saada käytännössä tietoa. Hylkäyssyy 2, eli epätäydellinen pinnoitus 2, ja hylkäyssyy 5, eli epäonnistunut leikkaus 1, vastaavat seuraavaksi suurimmista hylkäyssyyiden osuuksista.

4.4 Kustannusanalyysi

Saannon parantamisen potentiaalisilla säästöillä tarkoitetaan sitä summaa, joka säästettäisiin vähentämällä syntynyttä viallisten tuotteiden määrää. Ideaalitapauksessa kaikki tuotevialt saataisiin poistettua, jolloin hukkakustannuksia ei syntyisi lainkaan. Lähempänä realismia ollaan kuitenkin tapauksessa, jossa kolme suurinta vikasyitä sekä FT-testauksesta että visuaalisesta testauksesta saataisiin eliminoidua täysin.

Laskuissa jätetään työstökustannukset ja kalustokustannukset sekä kapasiteetti huomioimatta, sillä ne eivät tuo oleellista lisätietoa analyysiin nimenomaan saantotason muutoksien kannalta. Kustannuksissa huomioidaan siis työvoima- sekä materiaalikustannukset. Analyysi suoritetaan suuntaa-antavana esimerkkinä 10 000 kappaleen tuotannolla.

4.4.1 Prosessiketju 1

Suoritetussa kustannusanalyysissä oletetaan prosessiketjun 1 kokonaissaannon olevan 95%. Viallisia yksiköitä siis kaikista tuotetuista on 5%. Nämä vialliset yksilöt jakautuvat edelleen osiossa 4.1.1 esitetyn kuvan 26 (FT-testaus, testausjakso 2) mukaisesti eri hylkäyssyihin.

Kunkin hylkäyssyyden aiheuttamat hukkamäärät prosessiketjussa 1 on esitetty taulukossa 6 sarakkeessa ”Hylättyjen lukumäärä”. Luvut perustuvat oletukseen, että vialliset tuotteen jakautuvat hylkäyssyyltään FT-testauksen tarkkailujakson 2 mukaisesti.

Taulukko 6, Prosessiketjun 1 hylättyjen tuotteiden lukumäärä 10 000 kappaleen tuotantomäärällä ja 95% saantotasolla

Hylkäyssyy	%-osuus hylätyistä	Hylättyjen kappalemäärä
B-anturin huono sulaminen	60.4	302
A-anturin nystyt vinossa	16	80
Ei näkyvissä vikaa	10.4	52
A-anturissa litografinen vika	4.7	24
Pisara A-anturilla	3.8	19
B-anturin ladonta	2.8	14
Etsaus epäonnistunut	1.9	10

Koska syyllä ”Ei näkyvissä vikaa” ei voida käytännössä tehdä vielä mitään, jätetään se analyysin ulkopuolelle ja suoritetaan kustannusanalyysi uudelleen niin, että viat, joille hyvin potentiaalisesti voitaisiin tehdä jotain, saataisiin täysin eliminoidua. Näitä vikoja ovat ”B-anturin huono sulaminen”, ”A-anturin nystyt vinossa” ja ”Etsaus epäonnistunut”. Kustannuslaskenta suoritettiin kaavan 22 mukaisesti.

$$\frac{C_{\text{prosessiketju1}}}{\text{yksikkö}} = \frac{1 * 8h * \frac{25\text{€}}{h} + 400 * (3\text{€} + 0,4\text{€} + 0,8\text{€})}{400} = 4,70\text{€} / \text{yksikkö}$$

Laskelmassa oletettiin, että työtä tehdään päivässä 8 tuntia, sen hinta on 25 euroa tunnissa, päivittäinen tuotantomäärä on 400 kappaletta ja materiaalien hinnat ovat suluissa annetun mukaiset.

$$C_{PK1,prefix} = \frac{4,70\text{€}}{\text{yksikkö}} * 500 = 2350 \text{ €}$$

Yhteensä hylättyjä yksiköitä oli kymmenestä tuhannesta 500 kpl, joten hukkakustannukset, $C_{PK1,prefix}$ olivat 2350 euroa. Tämä perustuu siihen, että hukkakustannusten tilalle joudutaan valmistamaan sama määrä uusia, toimivia tuotteita.

Yhteensä valitut kolme poistamispotentiaalista hylkäyssyytä kattoivat 302 hylättyä kaikista 500 hylätystä yksiköstä, jolloin pelkästään niiden hukkakustannus on 1842,40 euroa.

Mikäli kyseiset hylkäyssyyt saataisiin eliminoitua prosessista, vähenisi viallisten määrä 108 kappaleeseen olettaen että muut hylkäyssyyt pysyisivät muuttamattomina. Tällöin siis 10000 kappaleen otoksesta häviäisi 302 viallista 198 viallisen yksikön säilyessä. Näin ollen hukkakustannukset olisivat noin 930 euroa.

4.4.2 Prosessiketju 2

Prosessiketjussa 2 hylkäyssyiden oletettiin jakautuvan kuten visuaalisen tarkastuksen tulokset tarkastelujaksolta 2 näyttivät, eli kuten taulukkoon 7 on koottu. Visuaalisen tarkastamisen saantotasot vaihtelevat käytännössä paljon, mutta käytetään tässä esimerkissä pessimististä saantotasoa 85%. Tällä saantotasolla ja 10 000 yksikön tuotantomäärällä saadaan taulukossa 7 esitetty frekvenssijakauma eri hylkäyssyistä.

Taulukko 7, *Hylättyjen lukumäärä syiden mukaan jaoteltuna 1500 hylätyn tuotteen suhteen*

Hylkäyssyy	%-osuus hylätyistä	Hylättyjen kappalemäärä
Pinnoituksen 1 roiskuminen	46.1	692
Pinnoituksen 1 ylimäärä ja pisarointi	13.5	203
Muu syy	10.6	159
Pinnoituksen 1 epätasaisuus	10.3	155
Epäonnistunut leikkaus 1	8.5	128
Pinnoituksen 2 leviäminen	5.7	86
Anturin vioittuminen	2.8	42
Pinnoituksen 2 epätasaisuus	1.5	23
Useita ylläolevia syitä	0.9	14

Tuotantokustannukset kutakin tuotettua yksikköä kohden on laskettu kaavaan 19 perustuen.

$$\frac{C_{\text{prosessiketju2}}}{\text{yksikkö}} = 4,70 \frac{\text{€}}{\text{yksikkö}} + \frac{1 * 8h * \frac{25\text{€}}{h} + 400 * (0,2\text{€} + 0,2\text{€})}{400} = 5,60 \text{ € / yksikkö}$$

Laskelmat on tehty 400 päivittäisellä volyymilla, samanpituuisella työpäivällä sekä samanhintaisella työllä kuin prosessiketjun 1 tapauksessa ja materiaalihinnat ovat 0,2 euroa per käsittely.

$$C_{PK2, \text{prefix}} = \frac{5,60\text{€}}{\text{yksikkö}} * 1500 \text{ yksikköä} = 8400 \text{ €}$$

85%:n saantotasolla hukkakustannuksia ($C_{PK2, \text{prefix}}$) tulee yhteensä 8400 €. Korjatussa kustannuslaskelmassa kolme suurinta kohdistettua syytä olisi saatu eliminoitua, eli kaikki

pinnoitukseen 1 liittyvät ongelmat. ”Muu syy” jätetään jälleen analyysin ulkopuolelle, sillä sille ei käytännössä voida tehdä mitään tällä hetkellä.

Kolme valittua hylkäyssyytä kattavat 1500 hylätystä yksiköstä 1050. Mikäli kyseiset hylkäyssyyt saataisiin täysin eliminoidua, hukkakustannukset laskisivat 2520 euroon, sillä hylättyjen yksiköiden määrä laskisi 1500:sta 450:een. Prosessiketjun 1 ja 2 kustannuslaskelmat on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8, *Kustannusanalyysin tulokset, hukkakustannuksien kehitys saantotason nostamisen jälkeen*

Prosessiketju	Tämänhetkinen		Potentiaalinen		Kustannusten muutos	
	Saantotaso	Hukkakustannus	Saantotaso	Hukkakustannus	Prosentuaalinen	Rahallinen
1	95%	2350 euroa	98.02%	930.60 euroa	-60.43%	-1419.40 euroa
2	85%	8400 euroa	95.50%	2520 euroa	-70%	-5880.00 euroa

Taulukosta 8 voidaan nähdä, että kustannuksia pystyttäisiin potentiaalisesti laskemaan ensimmäisestä prosessiketjussa 60 prosenttia ja toisessa prosessiketjussa 70 prosenttia.

5 Pohdinta ja johtopäätökset

Tässä osiossa pohditaan tutkittujen prosessien ongelmakohtia ”Tulokset” -osion löydösten perusteella. Kullekin hylkäyssyyllä etsitään juurisyitä, eli prosessia, josta se on peräisin, sekä tarkempaa analyysia, mikä viallisuuden prosessissa aiheuttaa. Mikäli syvempää analyysia viallisuuden aiheuttajalle ei voida tehdä, pohditaan kuinka viallinen anturi tai yksikkö jäisi mahdollisimman aikaisin tarkastus- ja testausvaiheissa kiinni, jottei se etenisi tuotantoprosessissa turhaan eteenpäin. Lopuksi hylkääntymisiä aiheuttaviin prosesseihin ehdotetaan parannustoimenpiteitä sekä mahdollisia investointeja.

5.1 FT-testauksen hylättyjen yksiköiden alkuperä

Hylkäyksen ensimmäisen testausjakson juurisyiden paretodiagrammista nähtiin, että miltei puolet hylätyistä yksiköistä johtui B-anturin ladonnan epäonnistumisesta, joka liittyy taulukon 4 mukaan tuotannon puhdashuoneen toimintaan. Anturitehtaan viat kattavat kuitenkin myös yli neljäsosan vioista ja loput reilu 20 prosenttia ovat tunnistamattomia vikoja. Hylättyjen yksiköiden määrä voitaisiin siis miltei puolittaa, mikäli B-anturin ladonnan hylkäyssyyistä päästäisiin eroon. Ladontatyökalu vaikuttaa olevan liian suuri pienelle B-anturille, minkä johdosta työkalu ajoittain ”tiputtelee” tai asettelee huonosti antureita. Tämän tarkkailujakson aikana B-anturin ladonnassa oli normaalia enemmän ongelmia, joista päästiinkin eroon toisella tarkkailujaksolla ladontalaitteistoa säätämällä. Ladontaongelman ratkaisemiseksi ladontalaitteiston työkalun kehittämistä tai vaihtamista kannattaisi harkita. Toinen vaihtoehto on seurata tarkasti ongelmien ilmenemistä ja korjata ongelmat säätämällä laitteistoa, tosin tämä on vain väliaikainen ratkaisu.

Underfillissä ei ollut havaittavissa mikroskoopilla minkäänlaista jälkeä kuplista tai muista selkeistä underfill-liitoksen epäsäännöllisyyksistä. Isohkot kuplat ja muut epätäydellisyydet olisivat olleet todennäköisesti nähtävissä mikroskoopilla. Toisaalta myös Lu et al.²⁴ tutkimuksessa, jossa huomattavasti suurempi siru liitettiin FR-4-alustalle flip chip -teknologialla, oli myös huomattu ettei kuplimista havaittu paljon suuremmassakaan liitoksessa, joten underfillistä itsestään johtuvat ongelmat eivät liene olevan yleensäkään kriittisiä. Lu et al.:n tutkimuksessa tutkittiin termisen syklisen kuormituksen vaikutusta liitosten luotettavuuteen, ja siinä flip chip -liitos kulki pitkästi piirilevyn lävitse usean kontaktikohdan kautta. Liitosta testattiin -25°C ja 125°C

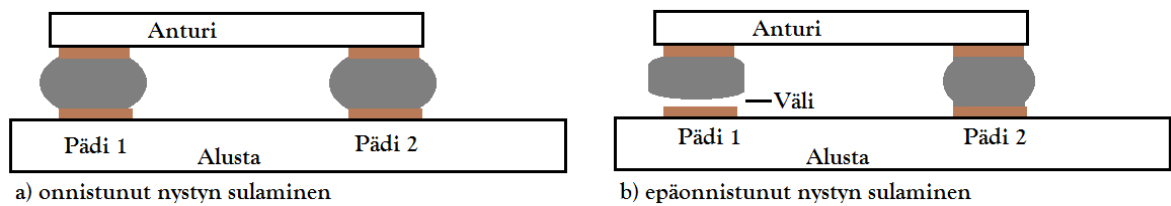
lämpötiloissa, jossa näytettä pidettiin 15 minuuttia, ja sykli toistettiin 1000 kertaa. Liitoksen katsottiin pettäneen kun yksi liitos katkesi eikä virta enää kulkenut piirissä. Tutkimuksessa havaittiin, että liian suuren voiman käyttö bondaamisvaiheessa voi vaurioittaa juotosnystyjä sekä aiheuttaa underfillin pakkautumisen nystyjen alle juotoksen juoksutuksen jälkeen, toisaalta liian pieni voimankäyttö voi jättää välin substraatin ja juotosnystyn välille, jolloin kontaktia ei synny. Diplomityön kohteena olevan tuotteen kannalta voimankäyttö bondausvaiheessa on rajoitettu B-anturin pienen koon vuoksi. On mahdollista, että B-anturia ei paineta riittävällä voimalla alustaa vasten, mistä johtuen sähköistä kontaktia ei synny, mutta ratkaisuna ei voida nähdä voiman lisäämistä ilman että anturin geometriaa muutetaan niin, että sen lujuus kasvaa.

Toisaalta Lu et al.:n tutkimuksessa huomattiin, että underfillin lämpölaajenemiskerroin on käänteisesti verrannollinen liitoksen kestävyysajan syklisessä termisessä kuormituksessa. Mikäli diplomityön tutkimuksen kohdetuotteen halutaan kestävän syklistä termistä kuormitusta ja liitoksessa on havaittavissa laatuongelmia esitellyn tuotantoprosessin jälkeisissä vaiheissa, tulisi underfillin lämpölaajenemiskertoimeen perehtyä ja tutkia löytyisikö vaihtoehtoinen underfill testattavaksi, jonka lämpölaajenemiskerroin on pienempi. Toisaalta Lu et al.:n tutkimus tehtiin erittäin jäykällä substraatilla, joten mikäli myös alustan materiaali laajenee myös voimakkaasti lämmön vaikutuksesta, tulisi underfillin lämpölaajenemiskerroin pikemminkin sovitaa lähelle substraatin sekä sirun vastaavaa.

Etsausongelmat liittyvät suoraan anturitehtaan prosesseihin, eikä niille voida tehdä mitään enää tuotannon puhdashuoneella. Mikäli etsausprosessia ei pystytä parantamaan anturitehtaalla, olisi etsausviolliset anturit hyvä hylätä jo anturitehtaan testausvaiheissa. Anturitehtaalla suoritetaankin jo AOI-tarkastus tuotteille, joten kyseisen laitteiston ohjelmistoa säätämällä etsausviolliset yksilöt voidaan hylätä jo siellä. Kuvan 23 mukaisesti etsauksen epäonnistuminen on helppo huomata jo anturitehtaan AOI:ssa, joten AOI-ohjelmiston hyväksymisasetuksia säätämällä voidaan violliset yksilöt tunnistaa. Tämä vaatii jatkuvaa säätämistä ohjelmiston toimintaperiaatteen vuoksi, joten laitteen valvontaan kannattaisi mahdollisesti resursoida vakituinen työntekijä.

Toisella testausjaksolla B-anturiin liittyviä vikoja tutkittiin tarkemmin ja luotiin uudet hylkäysyykkoodit. Silloin huomattiin, että suurimpana hylkäysyykkinä oli B-anturin nystyjen huono sulaminen. Tämän hylkäysyykin voisi selittää nystyjen korkeuserot

kiekolla, jolloin matalampi nysty ei pääse yltämään allaolevan alustan kuparipäädille. Tilannetta on havainnollistettu kuvassa 34.



Kuva 34, a) Samankokoisten nystyjen sulaminen ja b) korkeuserosta johtuva juotoksen sulamisen epäonnistuminen

Tätä teoriaa tukee kuva 25 kiekkoista, joissa varsinkin kuvissa a) ja d) näkee selvästi nystyjen korkeuseroja. Nystyjen paikoitukset vaihtelevat, samoin koot sekä muodot. Muodoista nimenomaan korkeuserot vaikuttaisivat olevan tuhoisimpia flip chip - prosessin saannon kannalta B-anturin tapauksessa. Paikoituserot eivät vaikuttaneet olevan suurena syynä B-anturin hylkyihin. Tähän voi mahdollisesti olla syynä B-anturin hyvin pieni massa, jonka vuoksi juotteen pintajännitys sulamuodossa riittänee liikuttamaan anturin pädin suhteen oikeaan kohtaan. Lisäksi kuvan 32 mukaisen tilanteen toteutumista tukee havainto, ettei alustan kuparipädi ole lainkaan kostunut juotosnystystä. Tämä ilmiö on havaittavissa kuvasta 24 a), jossa B-anturin vastaavissa päissä vasen juotosnysty on mattapintainen ja mahdollisesti pakkausadhesiivin alla yltämättä alustan pädille, kun taas oikeanpuoleinen nysty on kiiltävä ja näyttää yltävän pakkausadhesiivin lävitse, jolloin se on siis ollut kontaktissa alustan alapädille. Tämä krooninen eroavaisuus B-anturin ja alustan päiden painoittui nimenomaan alustan yläkontaktiin. Käytännössä aina toisella tarkastusjaksolla alempi alustan pädi oli kostunut, ja siis juottunut, kun taas ylempi alustan pädi oli kuparinvärinen ja kostuttumaton. Anturitehtaalla tulisi tehdä jatkotutkimusta siitä, mistä nystyjen muotoerot ja sitä myötä korkeuserot johtuvat ja hakea prosessiin muutoksia. Toinen vaihtoehto on säätää anturin komponenttitestauksen yhteydessä tehtävää AOI-tarkastusta niin, että se tunnistaa samalla sirulla olevien nystyjen muotoerot, ja hylkää mikäli näiden eroavaisuus on yli tietyn toleranssin. Anturitehtaan AOI-laitteistoa voitaisiin kehittää niin, että se ylhäältä päin kuvatessa laskee juotosnystyjen pinta-alan. Olettaen, että nystyt ovat tilavuudeltaan samankokoisia, joka on pätevä oletus, samalla sirulla niiden pinta-alan ollessa keskenään erisuuri, on niillä hyvin todennäköisesti korkeuseroja. AOI-laitteistoon tarvitsisi algoritmin, joka vertaa aina saman sirun nystyjen pinta-aloja, ja hylkää sirun mikäli ne ovat liian eroavat

toisistaan. Koska tuotannon puhdashuoneen flip chip -lämpökäsittelyuuni toimii moitteettomasti oikeankokoisilla ja -muotoisilla nystyillä, ei sen asetuksiin ole näillä näkymin syytä koskea.

A-anturin flip chip -liittämiseen liittyvä ongelma vaikutti liittyvän ennemminkin nystyjen paikkaan kuin kokoon. Kuva 27 c) havainnollistaa miltä anturin nysty näytti niissä tapauksissa, kun nystyn epäiltiin olevan vinossa anturilla. Tällainen tismalleen sama ulkonäkö oli havaittavissa kuvatuissa antureissa kuvassa 21 b). Kyseisenlaisissa yksiköissä virta kyllä kulki piirissä, joten resistanssi ei saanut B-anturin tapauksen mukaisesti testilaitteen resistanssin maksimiarvoja, mutta resistanssit olivat silti monta kertaluokkaa liian suuria. Kaavaan 1 nojautuen vaikuttaisi, että yksiköiden vikatilat ominaisuuteen E liittyen johtuivat nystyn luomasta epätäydellisestä kontaktista, joka johtui johtavan nystyn pienestä poikkapinta-alasta. Tämä hyvin todennäköisesti johtui nystyjen vaihtelevasta paikoituksesta kiekolla. Vaihtelevaa paikoituista tukee kuva 25 c) anturikiekosta, jossa on hyvin nähtävissä kuinka eri kohdissa juotosnystyt paikoitellen sijaitsevat. Toisin kuin anturin B tapauksessa, A-anturia ei sulan juotteen pintajännitys riitä siirtämään sopivalle kohdalle alustan pädien suhteen, jolloin flip chip -teknologian itsekohdistuvuus-ominaisuus estyy. Tämä johtuu siitä, että anturilla on kolme juotosnystyä rivissä molemmissa päissä anturia. Mikäli yksi niistä on hieman oikealla, toinen on hieman vasemmalla ja kolmas on täysin keskellä, juotosten pintajännitykset ajavat anturia eri suuntiin suunnilleen yhtä suurilla voimilla. Tämän lisäksi A-anturi on massaltaan huomattavasti B-anturia suurempi, joten pintajännitys saattaa olla vähemmän tehokas A-anturin tapauksessa. Anturitehtaalla olisi hyvä tehdä lisätutkimusta myös nystyjen paikoituksen suhteen, ja mahdollisesti alkaa valvomaan ja säätämään nystyttämisprosessia tarkemmin.

5.2 Funktionaalinen testaus ja sen luotettavuus

FT-laitteiston luotettavuus on herättänyt epäilyksiä operaattoreiden keskuudessa, sillä ominaisuuden B ollessa hyväksymisrajan ulkopuolella, yksiköt läpäisevät testin hyvin usein uudelleentestaamalla. Tällaisia yksiköitä tosin tulee vastaan vain ajoittain tuotannossa.

Funktionaalisen testauksen Gage R&R -tutkimus toi esiin, että mittauslaitteisto itsessään aiheuttaa mittauksiin jonkin verran vaihtelua. Suurin osa mittaustulosten vaihtelusta selittyi mitattavien yksiköiden välisillä eroilla kaikkien ominaisuuksien suhteen.

Operaattorit eivät aiheuttaneet juurikaan vaihtelua mittaustuloksiin, mikä oli odotettavissa mittauslaitteen muotoilun vuoksi. Muotoilu oletettavasti eliminoi eroavuudet operaattorien välisissä mittauksissa, sillä laitteeseen ei käytännössä voida asettaa mitattavaa yksikköä kuin yhdellä tavalla.

Gage -tutkimuksen mukaan mittalaitteiston toimivuutta ja luotettavuutta ei ole syytä kyseenalaistaa vastoin hypoteesia. Tulokset viittaavat kuitenkin siihen, että mittalaitteisto aiheuttaa pientä vaihtelua mittaustuloksiin B-ominaisuutta mitattaessa. Lisäksi yllättäen mittalaitteisto aiheutti ominaisuudelle E miltei samansuuruisen vaihtelun, vaikkei sen luotettavuutta oltu kyseenalaistettu operaattoreiden keskuudessa. Toistettavuuden vaihteluun vaikuttava komponentti oli kaikkien ominaisuuksien suhteen niin pieni, se oli selvästi Gagen ohjearvorajoja alhaisempi, joten mittalaitteistoa voidaan pitää tulosten pohjalta luotettavana.

Gage R&R-tutkimuksen luotettavuus voidaan kuitenkin yleisesti kyseenalaistaa, sillä mitattu ja analysoitu otos on melko pieni, yleisen standardin mukaan kymmenen mitattavaa yksikköä riittää⁴¹. Mittauskertoja ja testaavia operaattoreita on toki useampi, standardin mukaan 3 molempia, mutta otos on silti pieni suuren kapasiteetin tuotannossa, esimerkiksi jos yksiköitä tuotetaan vuodessa 500 000 kappaletta. Tällöin myöskään näitä A ja B –ominaisuuden erikois- ja rajatapauksia, jotka ovat epäilyksiä operaattorien keskuudessa herättäneet, ei välttämättä päätynyt juuri tähän testiin. Potentiaalisesti huoleksi nousee lisäksi se, että mikäli näiden ominaisuuksien mittausta on epäluotettava, ovatko yksiköt laadultaan päteviä tuotteita läpäistessään testin. Olisi tärkeää tutkia, kun hylättyjä yksiköitä esimerkiksi ominaisuuden B suhteen tulee, onko vika vain mittauslaitteistossa, vai onko itse tuotteissa ajoittain esiintyvä vika.

FT-testaus on kaikesta huolimatta äärimmäisen tärkeä testaus tässä vaiheessa prosessia. Se suoritetaan anturin flip chip -liittämisen jälkeen, jolloin testaus paljastaa nopeasti flip chip -prosessin uudelleensäätämistarpeen tai muut ongelmat. Mikäli testaus poistettaisiin kokonaan tästä vaiheesta, anturin liittämisen ongelmat voitaisiin pahimmassa tapauksessa huomata vasta usean viikon päästä viimeisessä kalibroinnissa. Tällaisessa tilanteessa myöhään hylättävät yksiköt tuottaisivat mittavat kustannukset rahallisesti, olisivat tuhlanneet jo huomattavasti resursseja sekä niitä olisi ehditty tehdä todella suuria määriä. Tärkeää olisi kehittää FT-testauksen luotettavuutta hankkimalla uusi laite tai selvittämällä olemassa olevan laitteen epäluotettavuuden syy ja korjata se.

5.3 Visuaalinen tarkastus ja siinä kiinnijäävät hylkäyssyyt

Visuaalinen tarkastaminen otettiin alunperin käyttöön, koska varsinkin pinnoitus 2:n epäonnistumisen epäiltiin aiheuttavan paljon tuotteiden hylkäystä, ja tämä prosessin epäonnistuminen oli verrattain helppo havaita visuaalisen tarkastamisen avulla. Tietokanta luotiin ja sitä alettiin ylläpitää, jotta visuaalinen tarkastaminen siirtyisi tilastollisen kontrollin piiriin. Visuaalisesta tarkastamisesta tallentui siis tietokantaan saannon tasot sekä hylättyjen tuotteiden hylkäyssyyt. Tällä tavoin päästiin seuraamaan prosessien saantotasojen tilaa ja säätämään hylkäyssyytä aiheuttamaa prosessia mikäli saanto tippui korjausalueen tasolle. Visuaalisen tarkastuksen saantokaavion, eli kuvan 30, perusteella saantotaso käy jatkuvasti kontrollirajan alapuolella. Tästä johtuen oli perusteltua lähteä selvittämään hylkäyssyytä tarkemmin ja myös jatkossa seurata kyseisen tarkastuksen saantotasoa.

Operaattorit sekä esimiehet ovat kyseenalaistaneet visuaalisen tarkastamisen luotettavuutta tuotannossa. Tarkastajan on käytännössä mahdotonta olla täysin objektiivinen, sillä vaikka ohjeistus olisi todella hyvin tehty, niinsanotut rajatapaukset jakavat usein tarkastajat kahteen leiriin, tarkkoihin ja lepsumpiin tarkastajiin. Visuaalinen tarkastus on teoriassa hyvä tarkastus pintakäsittelyjen laadunvarmistukseen, mutta sen voisi korvata automaattisella optisella tarkastuksella (AOI), jossa tarkastaminen on koneistettu, eli tietokone tarkastaa pinnan laadun optisesti. Tämä eliminoisi tarkastuksen objektiivisuuden. Toisaalta AOI-laitteisto vaikuttaisi tarvitsevan jatkuvaa ylläpitoa ja säätämistä, jotta se säilyttäisi luotettavuutensa.

5.3.1 Pinnoitus 1

Hylkäyskoodit 1, 2 ja 6 johtuvat yksinkertaisesti pinnoitusprosessin 1 epäonnistumisesta, joka johtuu yleensä pinnoituslaitteiston vikatilasta, tai ylläpidon ja säädön tarpeesta. Toisen testausjakson aikana suurimmaksi hylkysyyksi nousi pinnoituksen 1 roiskuminen ja pinnoitus 1:n ylimääräisyys ja pisarointi.

Hylkäyskoodin 1 tapauksessa erilaiset imusysteemit, jotka imevät pinnoituksen ylimäärän pois, voivat olla tukkeutuneita tai valumissäiliö, johon osa pinnoiteylimäärästä valuu, voi olla liian täynnä. Pinnoituksessa 1 tuotteen päälle levitetään pinnoitusainetta suihkuttamalla. Pinnoitukseen 1 liittyvät syyt olivat suurimpana hylkäyssyyinä tarkastusjaksolla 2, joka oli ajankohdaltaan tarkastusjakson 1 jälkeen. Suurimpana syynä oli pinnoituksen 1 roiskuminen. Tämä aiheutuu todennäköisesti pinnoituslaitteiston

epätäydellisestä toiminnasta. Laitteistossa suihkutuksen ylä- sekä alapuolella pitäisi olla jatkuva yhtä voimakas imu, mutta operaattorit ovat havainneet ettei imu ole alapuolelta yhtä voimakas kuin ylhäältä tuleva imu. Tästä johtuen alaspäin suihkutettu pinnoitussumu vaihtaa leijumissuuntaansa ylöspäin, jolloin se saattaa muodostaa suurempia pisaroita sekä törmätä anturin herkkään aktiiviseen puoleen ja tarrautua siihen pyörteiden vaikutuksesta.

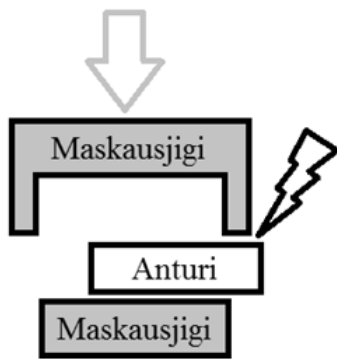
Pinnoitusprosessille 1 tulisi löytää paremmat prosessiparametrit. Esimerkiksi sumuttamisen etäisyyttä voisi ajatella pidennettäväksi. Lisäksi yhden kerroksen levittämisen puolittain voisi vaihtaa kahden ohuen kerroksen levittämiseksi, jolloin pinnoituksen ohuet kerrokset ehtisivät levittyä tasaisemmin, jolloin pisaroimiselta vältyttäisiin.

Toinen vaihtoehto on testata uutta pinnoitusmateriaalia. Esimerkiksi akryylin kerrotaan olevan helpostilevitettävä pinnoitusmateriaali.⁴³ Toisaalta uretaani tuottaa paremman kulutuksenkestävyyden sekä kemikaaliresistanssin.⁴³ Akryylipinnoitteeseen vaihdettaessa tuotteita tulisi käsitellä erityisen varovaisesti, sillä se raapiutuu helposti. Pinnoitusprosessista olisi syytä tehdä lisätutkimuksia keskittyen nimenomaan siihen, millaisella pinnoitusmateriaalilla tai prosessin muutoksella voitaisiin päästä eroon pinnoituksen pisaroitumisesta sekä roiskumisesta.

5.3.2 Pinnoitus 2

Pinnoitus 2:n tapauksessa mekaanisen maskauksen epäonnistuminen johtaa pinnoituksen leviämiseen, eli hylkäyskoodiin 2, kun taas pinnoitettavien yksikköjen epäpuhtaudet tai prosessilaitteiston huollon ja puhdistuksen laiminlyönti voi johtaa pinnoituksen epätasaisuuteen, eli hylkäyssyyhyyn 4. Maskausjigit ovat tuotantoprosessissa operaattorikäyttöisiä, ja niiden asetteleminen antureiden päälle vaatii tarkkuutta ja varovaisuutta. Anturin asettelemisen jälkeen maskausjigi lukitaan ja siirretään pinnoitusprosessiin. Mikäli anturi asettuu maskausjigin liikkuvien osien väliin huonosti, jigi voi rikkoa hauraan anturin, kun se lukitaan kiinni. Tilanne on havainnollistettu kuvassa 33. Toisaalta mikäli anturi jää jigin väliin hieman vähemmän vinosti, jigi ei sulkeudu kunnolla eikä ole tiivis.

Tästä johtuen anturille pääsee vuotamaan pinnoitusainetta, ja siitä seuraa hylkäyskoodi 3.



Kuva 35, *Anturin asetteleminen huonosti mekaaniseen maskaukseen*

Maskausjigeihin liittyvien ongelmien eliminointi vähentäisi hylättyjen yksiköiden määrää huomattavasti, sillä pelkästään pinnoituksen 2 leviäminen, eli hylkysyy 3 visuaalisessa tarkastuksessa, vastasi ensimmäisellä tutkimusjaksolla yli neljäsosasta hylättyjen tuotteiden hylkäysyydestä.

Jotta hylkäysyy 3 saataisiin eliminoidua, tuotannosta päätettiin poistaa kaksi mekaanista maskia tarkastusjakson 1 ja 2 välillä. Maskit vaikuttivat olevan vaikeasti käytettäviä. Niihen havaittiin rikkovan antureita sekä aiheuttavan anturille pinnoituksen vuotoa. Tulkinta perustui kirjoittajan omaan testaukseen, jonka tuloksena hän rikkoi useita yksiköitä ja havaitsi, että rikkoituneet yksiköt olivat pääasiassa peräisin kahdesta maskista. Maski ei ollut jäykkä, vaan siinä oli väljyyttä ilmeisesti ruuvien löysentymisen ja kulumisen seurauksena. Poistamisen jälkeen, eli toisella tutkimusjaksolla, huomattiin hylkäysyy 3 putoavan ensimmäiseltä paikalta kuudenneksi yleisemmäksi hylkäysyyksi. Se vastasi enää alle 6 %:sta hylättyjä yksiköitä verrattuna aikaisempaan yli 25%:iin. Hylkäysyytä ei kuitenkaan saatu täysin eliminoidua.

Maskeissa oli mitä ilmeisimmin vikaa ja ne olikin syytä poistaa tuotannosta. Kirjoittajan itse testatessa maskaamista, hän huomasi, että maskaaminen tulee tehdä erittäin varovasti ja samalla myös aikaa käyttäen, muutoin tuote vaurioituu. Satunnaisesti operaattorit käyttävät maskaamiseen liian vähän aikaa ja tekevät sen huolimattomasti, mistä johtuen tuotteet vaurioituvat peruuttamattomasti. Kun tuote rikkoutuu, sen yleensä huomaa sen rakshtaessa poikki, mikä tuntuu asentaessa tärähdyksenä sekä joissain tapauksissa sen voi jopa kuulla. Operaattorit tulisi opastaa ja motivoida maskien huolelliseen käyttöön ja maskien käyttöä tulisi mahdollisesti aluksi valvoa. Lisäksi operaattorit tulisi ohjeistaa

ilmoittamaan välittömästi esimiehille, mikäli ongelmia maskien tai laitteiden kanssa tulee.

5.3.3 Epäonnistunut leikkaus 1 ja anturin vioittuminen

Epäonnistunut leikkaus, eli hylkäys 5, johtuu leikkauslaitteiston vikatilasta tai säädön tarpeesta. Hylkäys 7 eli anturin vioittuminen johtuu yleensä huolimattomasta yksikön käsittelystä operaattorin toimesta. Leikkausta voidaan väliaikaisesti säätää ohjelmoimalla laitetta uudelleen, mutta se vaatisi työvoiman suhteen enemmän resursseja ja mahdollisesti jatkuvaa monitoroimista. Operaattorin täytyisi siis päivittäisellä tasolla valvoa ja säätää kyseisen laitteen toimintaa, ja tällä hetkellä tällaista työvoiman määrää ei ole resursoitu kyseiselle prosessille. Anturin vioittumista voidaan estää entistä huolellisemmalla yksiköiden käsittelyillä läpi tuotantoprosessin. Tähän voidaan käytännössä vaikuttaa kouluttamalla operaattoreita tai kehittämällä parempia suojaustelineitä yksiköille. Suurin vioittumisen vaara on yleisesti prosessien ja tarkastusten yhteydessä.

5.4 Kustannusanalyysi

Hylkäysyiden poistaminen ja samalla siis ”turhaan tuotetun” volyymin pienentäminen pienentäisi hukkakustannuksia prosessiketjusta riippuen eri tavalla. Esimerkin kustannusanalyysistä kävi ilmi, että prosessiketju 1:n saantotasoa olisi prosesseja säätämällä potentiaalista nostaa reilulla kolmella prosenttiyksiköllä. Tämä on huomattava nousu, ottaen huomioon jo lähtökohdan korkean saannon tason. Tämä leikkaa kyseisen prosessiketjun hukkakustannuksia 60 %:lla, joka on ehdottomasti tavoittelemisen arvoinen säästö. Analyysissä ei ole otettu huomioon toisaalta mahdollisten laitteistojen tai työvälineiden kustannusten jakamista prosesseihin, mutta kustannusanalyysi ilman niitäkin antaa suoraviivaisen vihjeen säästöjen suuruudesta. Lisäksi esimerkiksi uusien laitteiden investoinnit tuovat tietenkin kustannuksia. Voi silti olla taloudellisesti kannattavaa panostaa varsinkin anturitehtaan valmistusprosessien parantamiseen tai viallisten antureiden tunnistamiseen jo anturitehtaan AOI-vaiheessa. Mikäli seuraavassa vaiheessa piirilevyn, jolle anturit liitetään, hinta on 3 euroa, on se huomattava osuus koko tuotteen tuotantokustannuksista, jotka oli laskettu esimerkissä olevan 4,70 euroa. Tämä tarkoittaa, että jokainen valmiiksi viallinen anturi, joka liitetään piirilevyyn, käytännössä tuhlaa 3 euron piirilevyn, sillä sitä ei voida uudelleenkäyttää.

Prosessiketjussa 2 saantotasoa saataisiin nostettua peräti yli kymmenellä prosenttiyksiköllä, mikäli pinnoitukseen 1 liittyvät viat saataisiin eliminoidua. Tämä tarkoittaisi hukkakustannusten pienenemistä 70 %:lla. Tämäkin on erittäin huomattava säästö, johon kannattaisi ehdottomasti pyrkiä pinnoitusprosessia parantamalla.

Tosiasiassa kuitenkin vikoja tuskin saadaan täysin eliminoidua ja toisaalta jonkin toisen hylkäyssyyn määrä voi alkaakin kasvaa. Tästä syystä realistisesti saavutettavat säästöt ovat jotain kustannusten muutoksen ja nollamuutoksen välillä riippuen prosessin parannusprojektin onnistumisesta.

Lähteet

1. Tummala, Rao. 2009. *Fundamentals of microsystems packaging*, McGraw-Hill, USA. DOI: 10.1036/0071418075, s. 18
2. Tummala, Rao. 2009. *Fundamentals of microsystems packaging*, McGraw-Hill, USA. s. 94
3. Ohring, Milton. 1998. *Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices*, Academic Press, USA. s 411-426
4. Hsu, Tai-Ran, 2004. *MEMS Packaging*, Institution of Electrical Engineers, London, UK. s 5-25
5. Hsu, Tai-Ran, 2006. *Reliability in MEMS packaging*, An invited paper delivered at the 44th International Reliability Physics Symposium, San Jose, CA, March 26-20, 2006.
6. Solid State Technology, Insights for electronic Manufacturing:
<http://electroiq.com/blog/2002/04/wafer-level-mems-packaging/> [luettu 25.11.2015]
7. HyperPhysics:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/resis.html> [luettu 20.10.2015]
8. Wilson, Jon S. 2005. *Sensor Technology Handbook*, Elsevier, USA. s. 7
9. Measurement Specialties TM:
<http://precisionsensors.meas-spec.com/pdfs/rtd.pdf> [luettu 4.11.2015]
10. Basic Electronics Tutorials Site by Wayne Storr:
http://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html [luettu 25.11.2015]
11. Omega engineering Inc.:
http://www.omega.com/pptst/F_SERIES.html [luettu 19.9.2015]
12. University of Exeter:
<https://newton.ex.ac.uk/teaching/CDHW/Sensors/an046.pdf> [luettu 4.11.2015]
13. Wilson, Jon S. 2005. *Sensor Technology Handbook*, Elsevier, USA. s 547
14. Franssila, Sami. 2010. *Introduction to microfabrication*, 2nd edition. Wiley, USA. ISBN-9780470666722 s 364
15. Tong, Ho-Ming. 2013. *Advanced Flip Chip Packaging*, Springer, New York, USA. s. 54-66
16. Tummala, Rao. 2009. *Fundamentals of microsystems packaging*, McGraw-Hill, USA. s. 335

17. Tong, Ho-Ming. 2013. *Advanced Flip Chip Packaging*, Springer, New York, USA. s. 85
18. IEEE Components, Packaging and Manufacturing Technology society:
<http://www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/press/pressglsy.html> [luettu 23.10.2015]
19. Ohring, Milton. 1998. *Reliability and Failure of Electronic Materials and Devices*, Academic Press, USA. s. 450
20. Pac Tech Packaging technologies:
<http://pactech.com/files/23%20IMAPS%20FC%20WS%202002%20Austin,%20TX.pdf> [luettu 3.11.2015]
21. Madou, Marc J. 2011. *Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology, Volume III, From MEMS to Bio-MEMS and Bio-NEMS*, Taylor & Francis Group, USA. s. 221
22. Benson, R., Farrar, D., Miragliotta, J. 2008. *Polymer Adhesives and Encapsulants for Microelectronic Applications*, Johns Hopkins apl Technical Digest, vol 28, nro 1. s. 59
23. Wong, C.P., IEEE, Shi, S.H, Jefferson, G. *High Performance No-Flow Underfills for Low-Cost Flip-Chip Applications: Material Characterization*, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing technology – Part A, Vol. 21, No. 3, September 1998
24. Lu, H., Hung, K.C., Stoyanov, S., Bailey, C., Chan ,Y.C. 2002. *No-flow underfill flip chip assembly – an experimental and modeling analysis*, Microelectronics Reliability 42 (2002) 1205-1212
25. Licari, James. 2003. *Coating Materials for Electronic Applications – Polymers, Processes, Reliability, Testing*, Noyes Publications / William Andrew, Inc. USA. s 202-263
26. Clean Air Technology, Inc.:
<http://www.cleanairtechnology.com/cleanroom-classifications-class.php> [luettu 6.11.2015]
27. Solid State Technology: Insights for electronics manufacturing:
<http://electroiq.com/blog/2007/06/preventing-human-generated-particle-contamination-in-cleanrooms/> [luettu 6.11.2015]

28. Chen, Y., Li P. 2011. *The “Popcorn Effect” of Plastic Encapsulated Microelectronic Devices and the Typical Cases Study*, National Key Laboratory of Science and Technology on Reliability Physics and Application of Electronic Component, The 5th Electronic Institute of MII, Guangzhou.
29. Licari, J., Hughes, L. 1990. *Handbook of Polymer Coatings for Electronics*, 2nd edition, Noyes Publication, USA. s 178
30. Licari, James. 2003. *Coating Materials for Electronic Applications – Polymers, Processes, Reliability, Testing*, Noyes Publications / William Andrew, Inc. USA. s 104-115
31. Licari, James. 2003. *Coating Materials for Electronic Applications – Polymers, Processes, Reliability, Testing*, Noyes Publications / William Andrew, Inc. USA. s 66-67
32. Tummala, Rao. 2009. *Fundamentals of Microsystems Packaging*, McGraw-Hill, USA. s. 750-780
33. Drury, C. G., Watson, J. 2002. *Good Practices in Visual Inspection*, <http://www.dviaviation.com/files/45146949.pdf> [luettu 9.9.2015]
34. Licari, James. 2003. *Coating Materials for Electronic Applications – Polymers, Processes, Reliability, Testing*, Noyes Publications / William Andrew, Inc. USA. s. 411
35. Sandborn, P. 2012. *Cost Analysis of Electronic Systems*, World Scientific Publishing Co., Singapore. s. 24-30
36. Oakland, John S. 2003. *Statistical Process Control*, 5th edition, Butterworth-Heinemann, Massachussetts, USA. s. 4-22
37. Oakland, John S. 2003. *Statistical Process Control*, 5th edition, Butterworth-Heinemann, Massachussetts, USA. s. 105-131
38. Oakland, John S. 2003. *Statistical Process Control*, 5th edition, Butterworth-Heinemann, Massachussetts, USA. s. 63-81
39. Oakland, John S. 2003. *Statistical Process Control*, 5th edition, Butterworth-Heinemann, Massachussetts, USA. s.. 356-375
40. Minitab:
www.minitab.com [luettu 20.10.2015]
41. Adaptive Business Management Systems:
https://adaptivebms.com/Explanation_of_Gauge_R_and_R_MSA/ [luettu 9.9.2015]

42. DMAICTools:

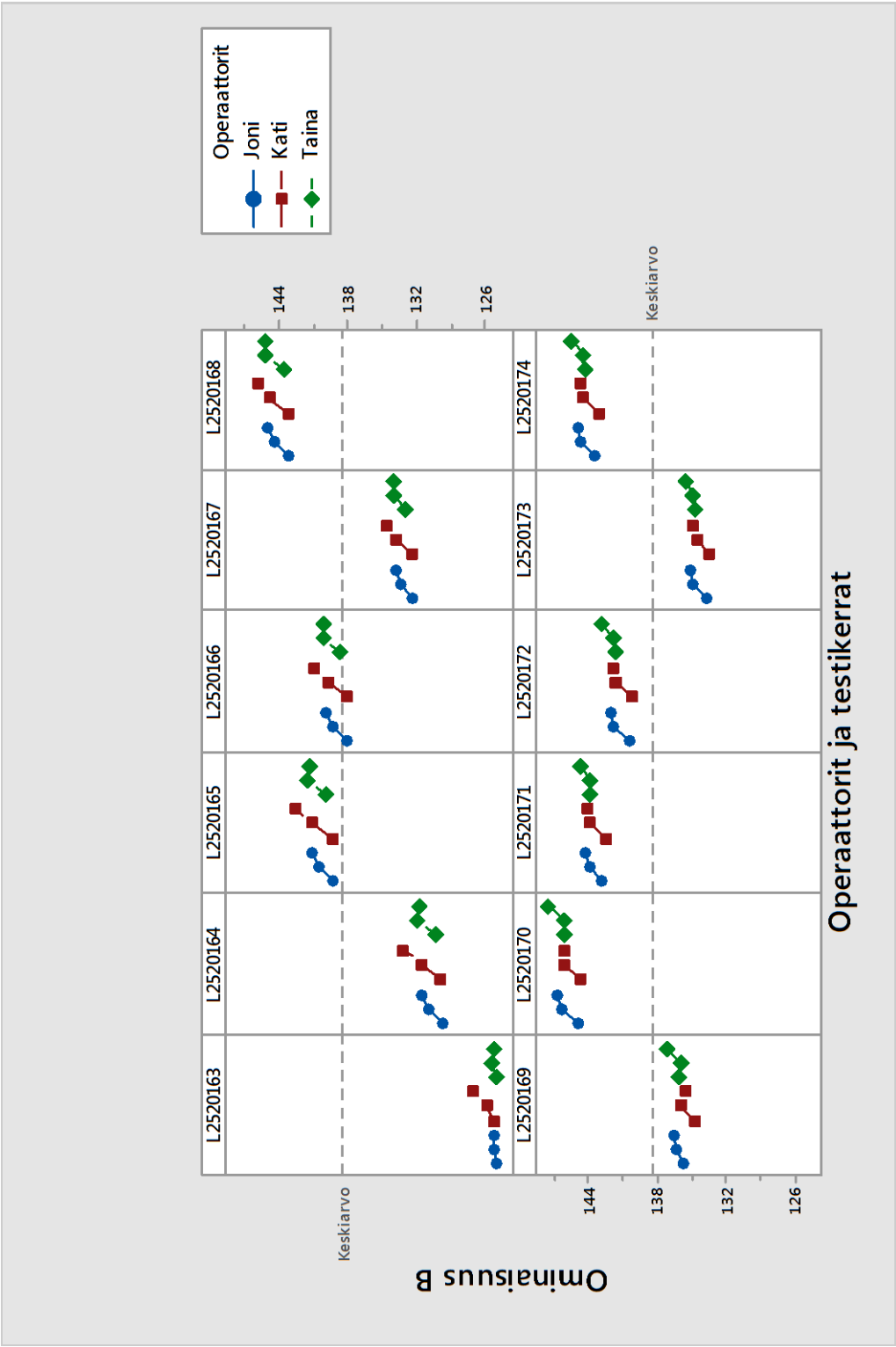
<http://www.dmaictools.com/dmaic-measure/grr> [luettu 9.9.2015]

43. Parylene Engineering:

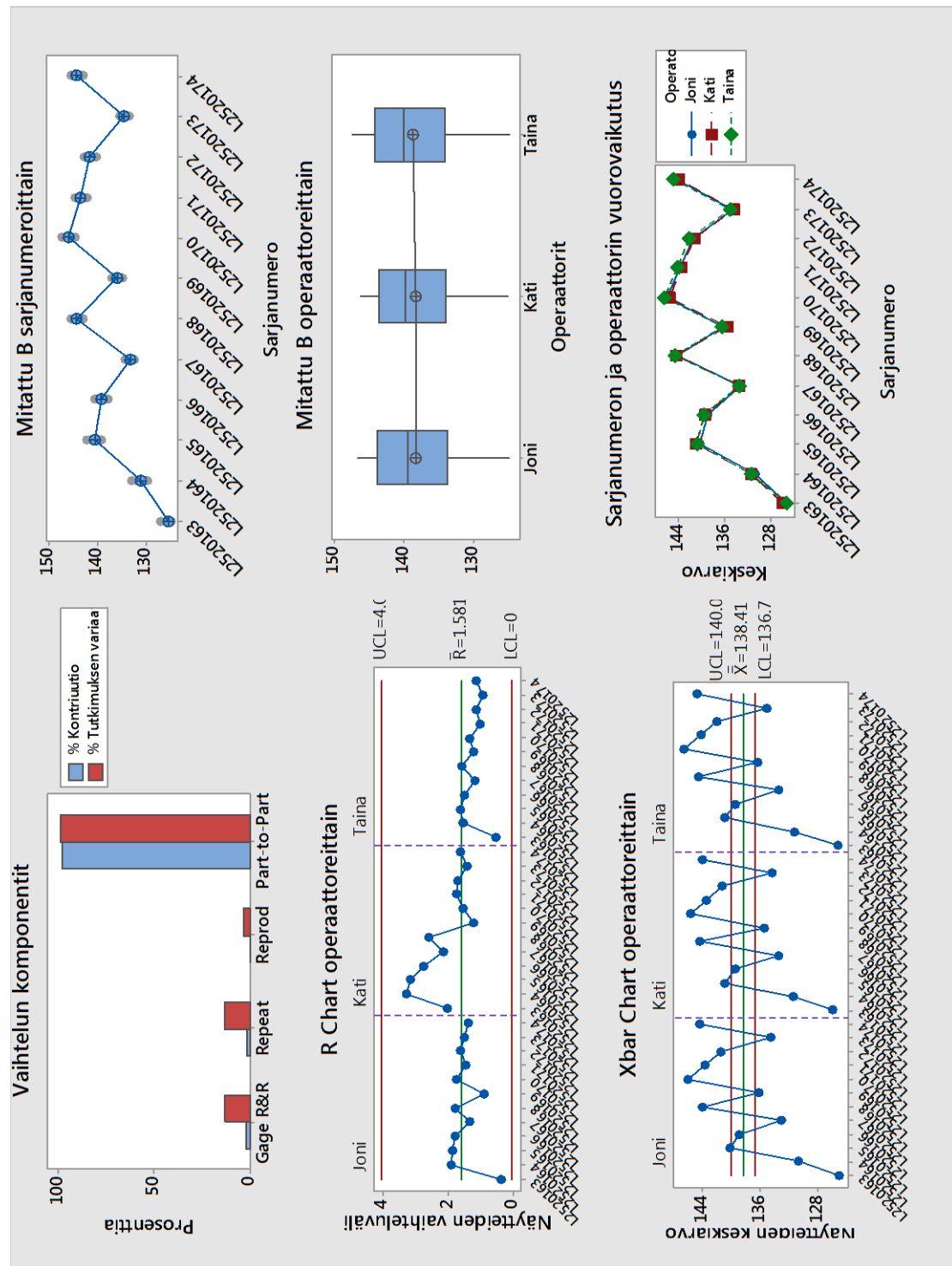
http://www.paryleneengineering.com/pdf/conformal_coating_removal_techiques.pdf [luettu 10.11.2015]

Liitteet

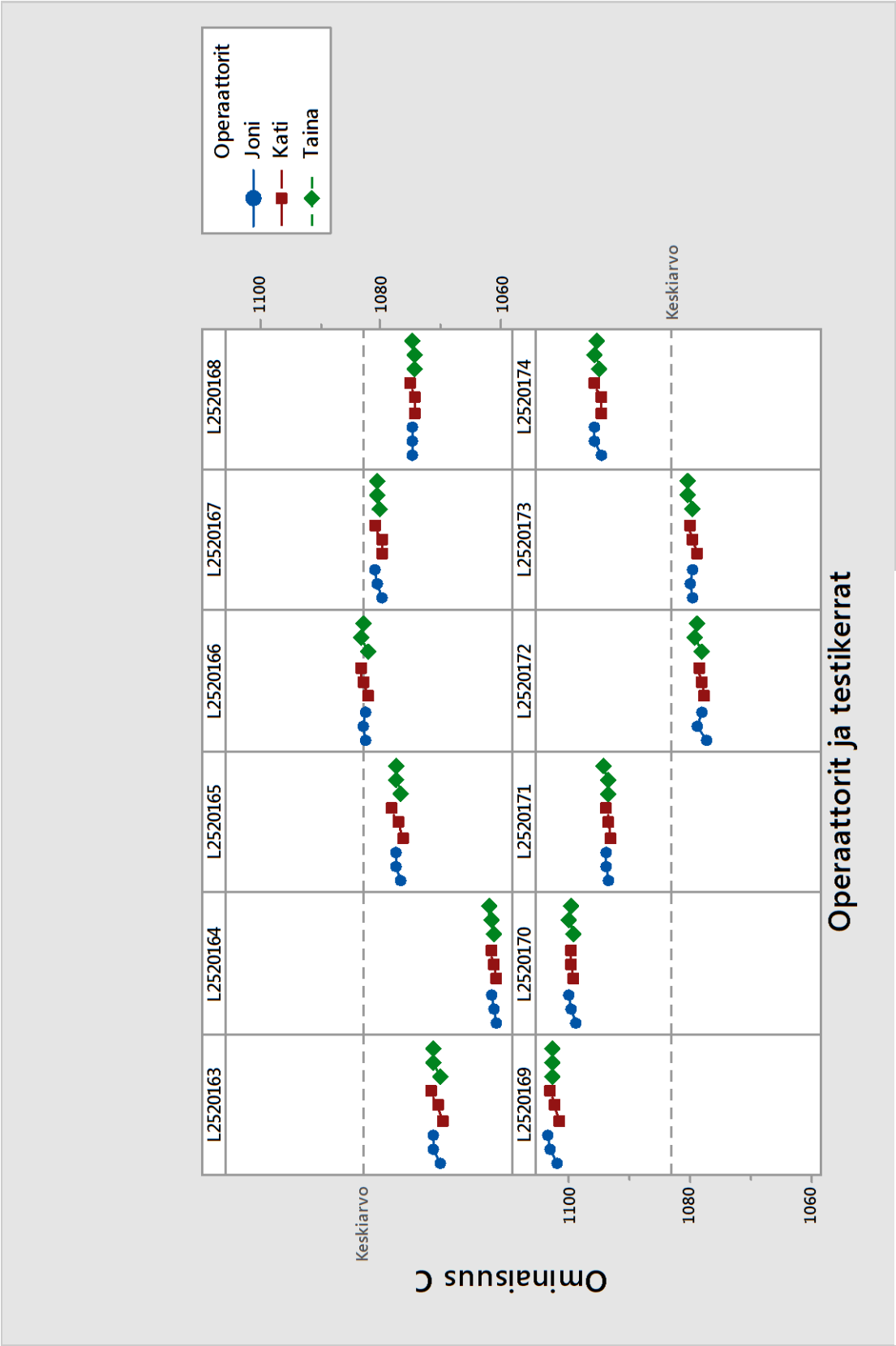
Gage R&R-tutkimuksen tulokset ominaisuuksien B, C, D ja E suhteen



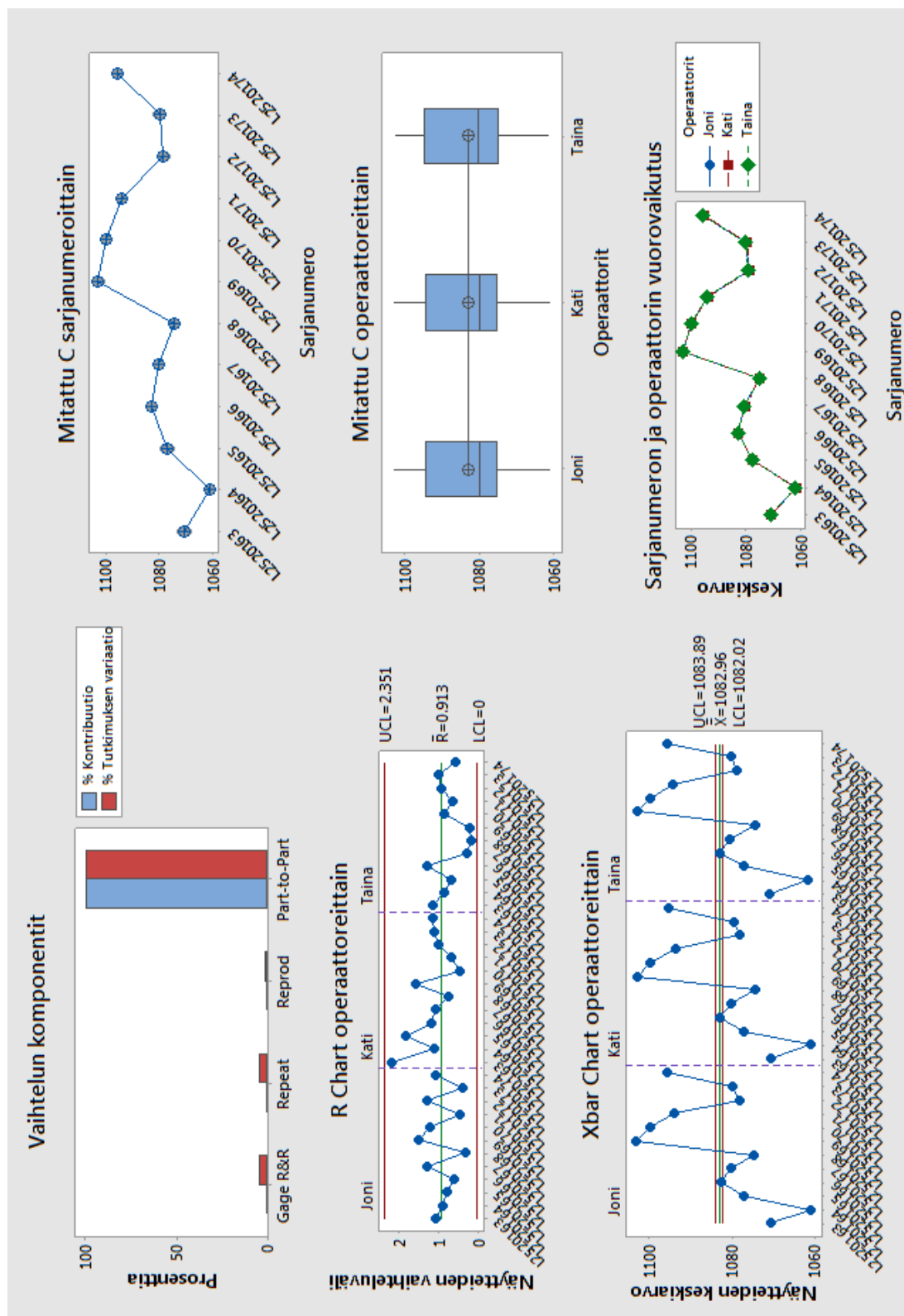
Kuva 36, Ominaisuuden B FT-testauksen Gage R&R -tuloksien kuvaaja



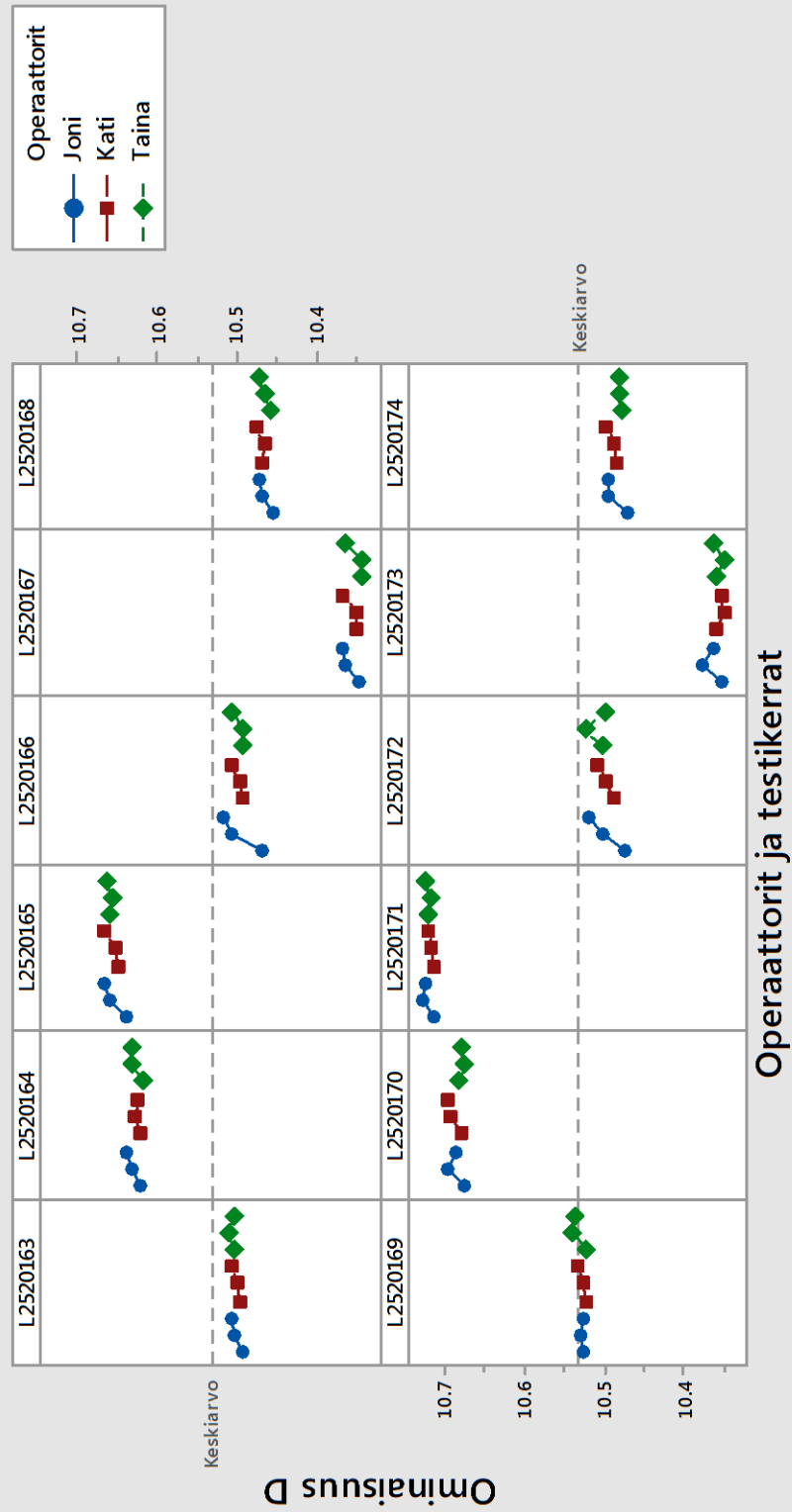
Kuva 37, Gage R&R -raportti ominaisuuden B testaamiselle FT-testissä



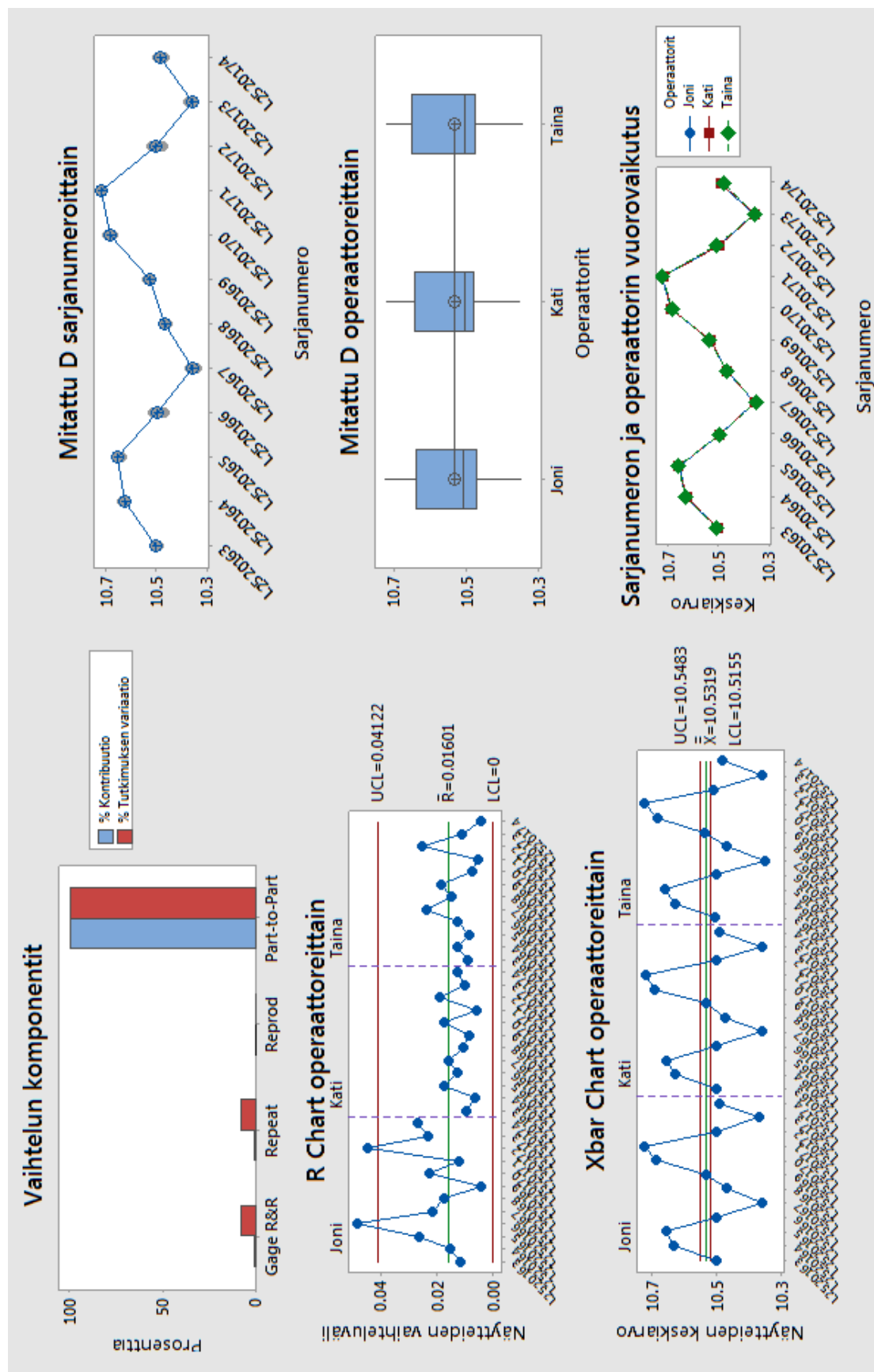
Kuva 38, Ominaisuuden C FT-testauksen Gage R&R -tuloksien kuvaaja



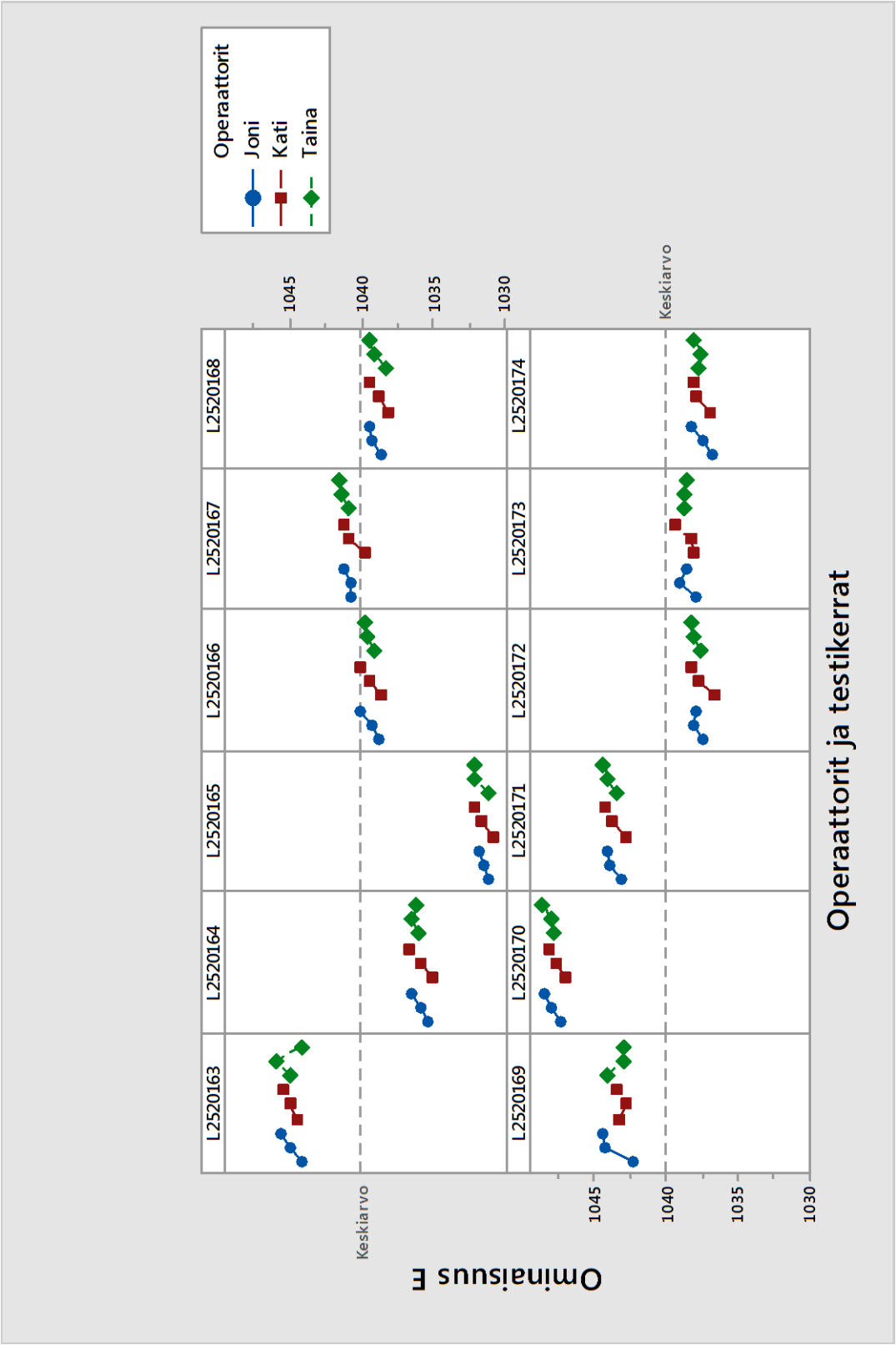
Kuva 39, Gage R&R -raportti ominaisuuden C testaamiselle FT-testissä



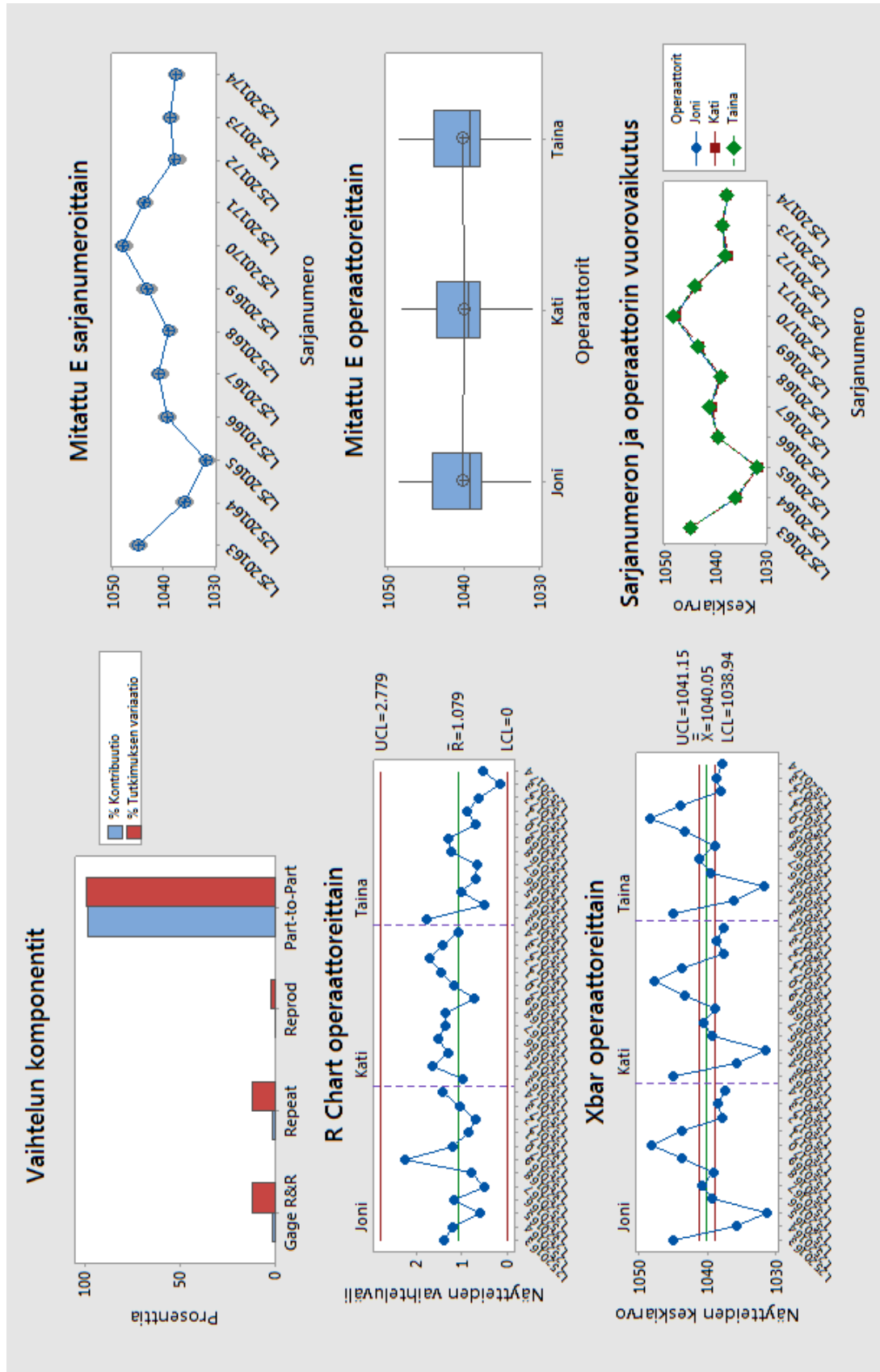
Kuva 40, Ominaisuuden D FT-testauksen Gage R&R -tuloksien kuvaaja



Kuva 41, Gage R&R -raportti ominaisuuden D testaamiselle FT-testissä



Kuva 42, Ominaisuuden E FT-testauksen Gage R&R -tuloksien kuvaaja



Kuva 43, Gage R&R -raportti ominaisuuden E testaamiselle FT-testissä